

Monitorización de estructuras de hormigón
mediante sensores de fibra óptica distribuida.

Tesis doctoral realizada por:
Gerardo Rodríguez Gutiérrez

Dirigida por:
Joan Ramon Casas Rius
Sergi Villalba Herrero

Barcelona, Junio 2017

Universitat Politècnica de Catalunya
Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TESIS DOCTORAL

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

Programa de Doctorat d'Enginyeria de la Construcció

TESIS DOCTORAL

**“Monitorización de estructuras de hormigón mediante sensores de fibra
óptica distribuida”**

REALIZADA POR:

Gerardo Rodríguez Gutiérrez

DIRIGIDA POR:

Joan Ramon Casas Rius

Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos.

Sergi Villalba Herrero

Doctor Ingeniero Industrial.

Barcelona, Junio 2017



Acta de calificación de tesis doctoral

Curso académico:

Nombre y apellidos

Programa de doctorado

Unidad estructural responsable del programa

Resolución del Tribunal

Reunido el Tribunal designado a tal efecto, el doctorando / la doctoranda expone el tema de su tesis doctoral titulada

_____.

Acabada la lectura y después de dar respuesta a las cuestiones formuladas por los miembros titulares del tribunal, éste otorga la calificación:

☐ NO APTO

☐ APROBADO

☐ NOTABLE

☐ SOBRESALIENTE

(Nombre, apellidos y firma)		(Nombre, apellidos y firma)	
Presidente/a		Secretario/a	
(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)
Vocal	Vocal	Vocal	Vocal

_____, _____ de _____ de _____

El resultado del escrutinio de los votos emitidos por los miembros titulares del tribunal, efectuado por la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado, otorga la MENCIÓN CUM LAUDE:

☐ SÍ

☐ NO

(Nombre, apellidos y firma)		(Nombre, apellidos y firma)	
Presidente/a de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado		Secretario/a de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado	

Barcelona, _____ de _____ de _____

Para Rocío, Emilio y Diego:

Por estar siempre conmigo y no permitirme claudicar en esta travesía.

A mis padres y hermana:

Fernando, Rosa María y María Fernanda, por su apoyo infinito.

AGRADECIMIENTOS

La elaboración de este trabajo dio inicio en Barcelona y concluyó en la Ciudad de México, y no hubiera sido posible sin la ayuda y colaboración de muchas personas e instituciones. En primer lugar agradezco al Prof. Joan Ramon Casas Rius, por haberme apoyado con sus conocimientos, observaciones y comentarios en la realización de este trabajo. También le estoy agradecido por su enorme calidad humana y espléndido trato que tuvo en todo momento para conmigo y mi familia durante nuestra estancia en Barcelona. A mi cotutor, el Dr. Sergi Villalba Herrero, por compartir su tiempo, conocimientos y propuestas para que este trabajo resultara de mayor calidad e interés. Al Prof. Jesús Miguel Bairán García por la oportunidad de colaborar en el proyecto de investigación a su cargo y haber podido probar la técnica de monitorización en la que se basa esta tesis doctoral.

A Ulric Celada y Noemi Duarte, por compartir experiencias durante la instrumentación y la realización de los ensayos de laboratorio. A todo el personal de Laboratorio de Tecnología de las Estructuras de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) que participó en los ensayos, extendiendo mi agradecimiento. De igual forma a António Barrias, por su amistad y ayuda en la recta final de los ensayos de laboratorio y la monitorización en campo del puente que se estudia en este trabajo.

Mi reconocimiento y gratitud al Prof. David Murià Vila por apoyarme desde que inicie mi carrera profesional, hasta la culminación de este ciclo. Su búsqueda de objetividad, pasión y perseverancia en su trabajo, son un ejemplo constante. Al Dr. José Cámara, le agradezco sus propuestas, asesoría y ayuda para el manejo de la información posterior a los ensayos en esta tesis, y le externo mi aprecio por su solidaridad en momentos de arduo trabajo. Al Dr. Oriol Arnau Delgado, por su tiempo y asesoría en el manejo del programa de análisis no lineal que se utiliza en un capítulo de esta tesis.

A Jonathan Tirado y Rogelio Guevara, por su colaboración en la mejora y elaboración de muchos de los gráficos que aparecen en este trabajo.

A Alejandro Villaseñor, le agradezco el tiempo invertido en la búsqueda de referencias que en ocasiones me eran difíciles de conseguir, y que al obtenerlas a través de él, me fueron de gran ayuda para conformar esta tesis. Pero más le agradezco, el siempre estar “allí” desde hace ya más de 30 años, a pesar de la distancia.

A mi mujer Rocío, y a mis hijos Emilio y Diego, les agradezco el haberme acompañado en esta aventura, siempre con el ánimo de conocer, experimentar y estar unidos.

Agradezco a mis padres Fernando y Rosa María, el haberme siempre ayudado, entendido y apoyado en mis decisiones. A mi hermana María Fernanda, le agradezco su solidaridad y amor hacia conmigo, Rocío y sus sobrinos.

Agradezco al Ministerio de Educación y Ciencia Español por su financiación para la realización de este trabajo a través de los proyectos BIA2013-47290-R, BIA2012-36848 y al FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional).

Finalmente, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), que a través del Instituto de Ingeniería y el programa PASPA (Programa de Apoyo para la Superación del Personal Académico) de la DGAPA (Dirección General de Asuntos del Personal Académico), me brindaron el apoyo económico para realizar este trabajo de investigación doctoral.

Muchas Gracias

Ciudad de México, abril 2017

Gerardo Rodríguez Gutiérrez

RESUMEN

En esta tesis doctoral se presenta el uso de un reflectómetro óptico de retrodispersión denominado sistema OBR (optical backscattered reflectometer por sus siglas en inglés), como una herramienta de monitorización de la salud estructural (MSE) en estructuras de hormigón, las cuales pueden presentar fisuras incluso en condiciones de servicio.

La principal característica del sistema OBR es su gran sensibilidad y alta resolución espacial a través del uso de un cable de fibra óptica como sensor y que se denomina sensor de fibra óptica distribuida (SFOD). Lo anterior, produce registros de deformación en los cuales se puede identificar y localizar la presencia de fisuras. Así, en primer lugar se retoma la experiencia de una aplicación anterior, y se propone un método del cálculo de ancho de fisura promedio en estructuras de hormigón sujetas básicamente a flexión, y que se basa en la información de los registros de deformación que se obtienen con el sistema OBR.

A continuación, el sistema OBR se aplica en el estudio de tres vigas de hormigón parcialmente pretensado (HPP) de 8 m de longitud y sujetas a esfuerzo cortante. Estas vigas fueron instrumentadas tanto en forma convencional con sensores discretos, como con un SFOD adherido a la superficie. Con base en los resultados experimentales obtenidos, se evalúa la capacidad del sistema OBR para monitorizar estructuras de hormigón sujetas a cortante, y se propone un método para detectar, localizar y posteriormente cuantificar el ancho de fisura promedio a cortante.

Posteriormente, una de las tres vigas ensayadas a cortante y ya con la presencia de fisuras a lo largo de toda su longitud, es ensaya a flexión. En esta viga se evalúa la capacidad del sistema para detectar la presencia de fisuras ya existentes, y la aparición de nuevas fisuras. Una vez detectadas y localizadas las principales fisuras por flexión, se aplica el método del cálculo del ancho de fisura propuesto y se evalúan sus resultados.

También se lleva a cabo la aplicación del sistema OBR de una estructura en condiciones reales. Lo anterior consistió en la monitorización a lo largo de casi ocho meses, del proceso ampliación de un puente de hormigón pretensado de aproximadamente 86 m de longitud. En esta aplicación, los efectos de temperatura, fueron un factor muy importante y se tuvo en cuenta su corrección para una interpretación correcta de los datos obtenidos.

Por último, con base en lo observado a través de la información obtenida en cada uno de los ensayos experimentales comentados, se establecen las conclusiones en torno a las ventajas e inconvenientes de este tipo de sistemas opto-electrónicos de medición basados en el uso de SFOD, Cabe decir que la metodología propuesta en esta tesis produce unos resultados muy satisfactorios tanto en la detección, localización como cuantificación de la fisuración por flexión y cortante en estructuras de hormigón para niveles de sollicitación de servicio.

SUMMARY

This doctoral thesis presents the use of an opto-electronic system so-called OBR (Optical Backscattered Reflectometer) as an alternative of measurement in structural health monitoring (SHM) processes in concrete structures, which may present cracks even for service loads.

The main feature of the OBR system is its great sensitivity and high spatial resolution through the use of an optical fiber cable as a sensor, which is called the distributed optical fiber sensor (DOFS). Thanks to that, it becomes possible to obtain strain records where the presence of cracks can be identified and localized. Thus, the experience of an earlier application is first taken up and a method of calculating average crack width in concrete structures subjected to bending is proposed and it is based on information from the strain records obtained with the OBR system.

Afterwards, the OBR system is applied to the study of three partially pre-stressed concrete (PPC) beams of 8 m in length and subjected to shear stress. These beams were instrumented both in conventional form with discrete sensors, and with a DOFS adhered to the surface. Based on the experimental results obtained, the capacity of the OBR system to monitor concrete structures subjected to shear is evaluated, and a method is proposed to detect, locate and subsequently quantify the average shear crack width.

One of the three beams tested to shear and already with the presence of cracks along its entire length, is tested to flexion. In this test it is evaluated the system ability to detect the presence of existing cracks, and the appearance of new cracks. Once the main cracks have been detected and localized, the proposed method of calculating average crack width is again applied and the results checked.

Finally, the application of the OBR system to a real structure is carried out. The above consisted in the monitoring over almost eight months of the process of enlarging a two-span pre-stressed concrete bridge with a total length of 86 m. In this application, the effects of temperature were an important factor and their correction was taken into account for a correct interpretation of the obtained data.

Finally, based on what was observed through the information obtained in each of the previous cases, some conclusions are established regarding the advantages and disadvantages of this type of opto-electronic measurement systems based on the use of DOFS in the SHM of concrete structures. The main conclusion is that the method proposed in this thesis achieves a very satisfactory and promising results regarding the detection, localization and quantification of cracking both in bending and shear in concrete structures in the range of normal service loads.

ABREVIATURAS

BOCDA	Análisis de Correlación Óptica de Brillouin (Brillouin Optical Correlation Domain Analysis)
BOTDA	Análisis Óptico de Brillouin en el Dominio del Tiempo (Brillouin Optical Time Domain Analysis)
BOTDR	Reflectómetro Óptico de Brillouin en el Dominio del Tiempo (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)
DAIR	Deformación Aparente del Índice de Refracción
DAET	Deformación Aparente por Expansión Térmica
FOP	Fibra Óptica bajo Prueba
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System)
GPIS	Galga extensométrica colocada en un estribo
GPIL	Galga extensométrica colocada en el refuerzo pasivo longitudinal
HPP	Hormigón Parcialmente Pretensado
MEF	Modelo de Elemento Finito
MEMS	Sistema Micro Eléctrico Mecánico (Micro Electro Mechanical System)
MSE	Monitorización de la Salud Estructural
OBR	Reflectómetro Óptico de Retrodispersión (Optical Backscattered Reflectometer)
OFDR	Reflectometría Óptica en el Dominio de la Frecuencia (Optical Frequency Domain Reflectometry)
OTDR	Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (Optical Time Domain Reflectometer)
SFO	Sensor de Fibra Óptica
SFOD	Sensor de Fibra Óptica Distribuida
SWI	Barrido de Longitud de onda por Interferometría (Swept Wavelength Interferometry)

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
------------------------------	---

RESUMEN	IV
----------------------	----

SUMMARY	VI
----------------------	----

ABREVIATURAS	VIII
---------------------------	------

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 La monitorización estructural, el uso de tecnologías recientes y las estructuras de hormigón.....	1
1.2 Motivación e identificación de la problemática.....	6
1.3 Objetivos.....	10
1.4 Estructura de la tesis.....	11

2. BREVE RESEÑA HISTÓRICA Y FUNDAMENTOS DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA DISTRIBUIDA (SFOD)

2.1 Introducción.....	13
2.2 La fibra óptica como medio de iluminación, telecomunicación y como sensor.....	13
2.2.1 Breve reseña histórica.....	13
2.3 Fundamentos de los sensores de fibra óptica.....	15
2.3.1 Los sensores de fibra óptica (SFO).....	15
2.3.2 Dispersión de la luz.....	17
2.3.3 Dispersión de Rayleigh.....	19
2.3.4 Dispersión de Brillouin.....	20

IX

2.4 Clasificación de los SFO en función de su rango de medición.....	21
--	----

2.4.1 SFO discretos.....	21
2.4.2 SFO cuasi-distribuidos.....	22
2.4.3 SFO distribuidos (SFOD).....	22
2.5 Técnicas de monitorización con SFOD.....	23
2.5.1 Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR).....	23
2.5.2 Reflectómetro óptico de Brillouin en el dominio del tiempo (BOTDR).....	26
2.5.3 Análisis óptico de Brillouin en el dominio del tiempo (BOTDA).....	28
2.5.4 Retro-dispersión óptica por reflectometría (OBR).....	29
2.6 Principales sistemas de monitorización disponibles con SFOD.....	32

3. LOS SFOD EN LA MONITORIZACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL. ESTADO DEL ARTE

3.1 Introducción.....	34
3.2 Los sistemas de medición con SFOD en pruebas de laboratorio.....	35
3.2.1 Mecanismos de transferencia de deformaciones entre SFOD y distintos materiales.....	36
3.2.2 Monitorización de cables post-tensados con SFOD.....	37
3.3 Monitorización de obras civiles en servicio con SFOD.....	38
3.4 Monitorización de procesos constructivos con SFOD.....	40
3.5 Monitorización de pruebas de carga en puentes con SFOD.....	42
3.6 Monitorización temporal y a largo plazo de puentes con SFOD.....	45
3.7 Aplicación de los sistemas de medición con SFOD en estructuras de hormigón.....	49
3.7.1 Detección de fisuras en elementos de hormigón.....	49
3.8 Conclusiones.....	50

4. APLICACIÓN DEL SISTEMA OBR EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A FLEXIÓN

4.1 Introducción.....	53
4.2 Metodologías experimentales en elementos de hormigón sujetos a flexión.....	53
4.3 La problemática de la fisuración en las estructuras de hormigón.....	54
4.3.1 Fisuración de elementos de hormigón sujetos a tracción.....	55
4.3.2 Fisuración de elementos de hormigón sujetos a flexión.....	56
4.3.3 Definición del ancho de fisura por flexión.....	57
4.4 Método OBR para el cálculo del ancho de fisura promedio en elementos de hormigón sujetos a flexión.....	58
4.5 Aplicación del método OBR a una losa de hormigón sometida a flexión.....	60
4.5.1 Resumen del ensayo.....	60
4.5.2 Descripción de la instrumentación convencional.....	61
4.5.3 Descripción de la instrumentación con un SFOD.....	62
4.5.4 Resultados experimentales con ambos tipos de instrumentación.....	63
4.5.4.1 Anchos de fisura promedio con la instrumentación convencional.....	68
4.5.4.2 Anchos de fisura promedio con la aplicación del método OBR.....	69
4.5.4.3 Comparación de los anchos de fisura promedio obtenidos.....	71
4.6 Modelo numérico no lineal de la losa de hormigón armado.....	71
4.6.1 Justificación y características del modelo de elementos finitos (MEF) 2D.....	72
4.6.2 Calibración del MEF 2D.....	75
4.6.3 Resultados: Patrón de fisuración, localización y ancho de fisura.....	76
4.7 Conclusiones.....	81

5. MÉTODO OBR PARA LA MONITORIZACIÓN DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN SUJETOS A CORTANTE MEDIANTE FIBRA ÓPTICA DISTRIBUIDA

5.1 Introducción.....	82
5.2 La fisuración a cortante en elementos de hormigón.....	83
5.3 Metodologías experimentales para la obtención del ancho de fisura en elementos de hormigón sujetos a cortante.....	84
5.4 Método OBR para la caracterización de la fisuración por cortante.....	89
5.5 Implementación del método propuesto. Ensayos a cortante y flexión de vigas HPP.....	95
5.5.1 Objetivo de los ensayos.....	96
5.5.2 Metodología experimental.....	96
5.5.3 Características de las vigas HPP.....	97
5.5.4 Descripción de la instrumentación con sensores discretos.....	99
5.5.5 Descripción de la instrumentación con SFOD.....	102
5.5.5.1 Instrumentación con SFOD para los ensayos a cortante.....	102
5.5.5.2 Instrumentación con SFOD para el ensayo a flexión.....	107
5.5.6 Instalación de los SFOD.....	108
5.5.6.1 Instalación de los SFOD para los ensayos a cortante.....	108
5.5.6.2 Instalación del SFOD para el ensayo a flexión.....	112
5.5.6.3 Marco de referencia.....	114
5.6 El sistema de medición OBR.....	117

6. APLICACIÓN DEL MÉTODO OBR EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN PARCIALMENTE PRETENSADO (HPP) SUJETOS A CORTANTE Y FLEXIÓN

6.1 Introducción.....	119
6.2 Resultados de tres ensayos a cortante en vigas de HPP.....	120
6.2.1 Comportamiento del sistema OBR y los SFOD durante los ensayos.....	120
6.2.2 Resultados. Comportamiento del sistema OBR previo a la fisuración de las vigas HPP	
6.2.2.1 Viga I-1.....	123
6.2.2.2 Viga I-2.....	124
6.2.2.3 Viga I-3.....	125
6.2.3 Detección y localización de fisuras por medio de los SFOD.....	126
6.2.3.1 Viga I-1.....	131
6.2.3.2 Viga I-2.....	133
6.2.3.3 Viga I-3.....	136
6.2.4 Análisis de deformaciones por medio de los SFOD.....	138
6.2.4.1 Viga I-1.....	138
6.2.4.2 Viga I-2.....	175
6.2.4.3 Viga I-3.....	204
6.2.5 Identificación de patrones de fisuración por cortante mediante los SFOD.....	228
6.2.5.1 Viga I-1.....	228
6.2.5.2 Viga I-2.....	234
6.2.5.3 Viga I-3.....	239
6.2.6 El sistema OBR en la cuantificación del daño estructural por cortante.....	245
6.2.6.1 Deformaciones y anchos de fisura promedio con la instrumentación convencional...	245

6.2.6.2 Anchos de fisura promedio con la aplicación del método OBR.....	255
6.2.6.2.1 Viga I-1.....	260
6.2.6.2.2 Viga I-2.....	264
6.2.6.2.3 Viga I-3.....	267
6.2.7 Ensayo a flexión de la viga I-3.....	270
6.2.7.1 Comportamiento del sistema OBR durante el ensayo.....	270
6.2.7.2 Resultados. Comportamiento de la viga I-3 previo a la carga.....	271
6.2.7.3 Detección y localización de puntos de fisuración por medio de los SFOD.....	275
6.2.8 Conclusiones.....	286

7. MONITORIZACIÓN TEMPORAL DEL PROCESO DE AMPLIACIÓN DE UN PUENTE URBANO DE HORMIGÓN PRETENSADO CON UN SISTEMA OBR

7.1 Introducción.....	288
7.2 Comportamiento de los SFOD en condiciones ambientales.....	288
7.3 Técnicas de compensación por temperatura en los SFOD.....	289
7.3.1 Compensación por bucle de fibra óptica sin unir al sistema estructural.....	290
7.3.2 Compensación por temperatura punto a punto.....	291
7.4 Descripción del puente y objetivo de la monitorización.....	292
7.5 Monitorización con SFOD.....	295
7.6 Instalación de los SFOD y el sistema OBR.....	297
7.7 Proceso de monitorización temporal.....	299
7.8 Resultados.....	300
7.9 Conclusiones.....	312

8. CONCLUSIONES FINALES

8.1 Conclusiones finales.....	314
8.2 Futuras líneas de investigación.....	318

REFERENCIAS.....	320
-------------------------	------------

ANEXO A.....	328
---------------------	------------

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 La monitorización estructural, el uso de tecnologías recientes y las estructuras de hormigón

Actualmente dentro del campo de la ingeniería estructural, el uso de tecnologías recientes o de punta presenta cada vez mayor aceptación. Tanto en pruebas experimentales de laboratorio como de campo, la obtención de parámetros estructurales a través de sistemas de medición no convencionales es cada vez más frecuente. Esta aceptación, se ha extendido a la monitorización de una gran diversidad de complejos procesos constructivos, así como a la monitorización temporal o permanente de obras civiles recientes o que han envejecido y cuyo buen funcionamiento y mantenimiento es parte importante en el desarrollo de las actividades diarias, en un entorno social determinado. El uso de sensores de fibra óptica (SFO), sistemas de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés), radares, sistemas micro electro mecánicos (MEMS por sus siglas en inglés), y de técnicas de procesamiento de imágenes, ha abierto nuevas posibilidades en la adquisición de información que con anterioridad no podía ser obtenida, o solamente podía ser conocida en forma limitada. En las Figs. 1. 1 a 1.4, se muestran algunos ejemplos de la diversidad de aplicación de estas tecnologías en la ingeniería estructural.



Fig. 1.1 SFO embebido para la monitorización de una losa de hormigón (Notas SHMII-7 Short Course, 2015).

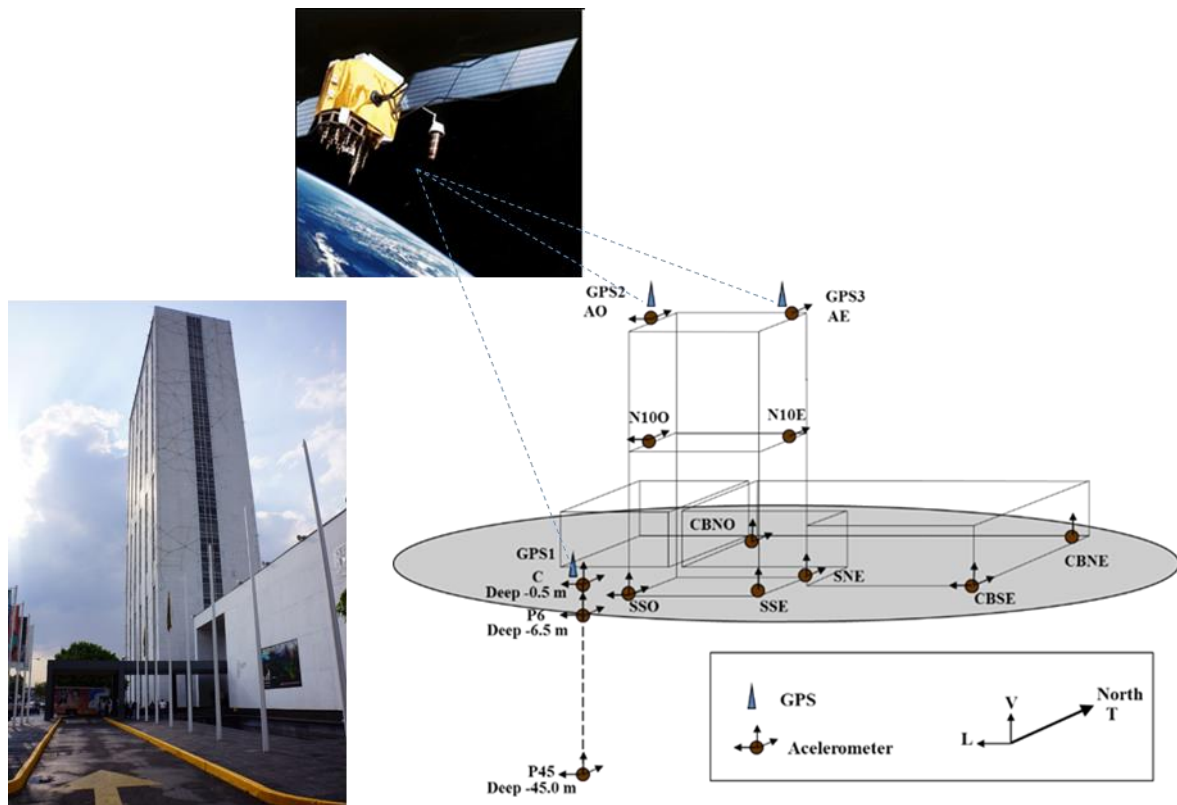


Fig. 1.2 Sistema GPS y red de acelerómetros para la monitorización de un edificio alto (Murià-Vila, et al., 2013).

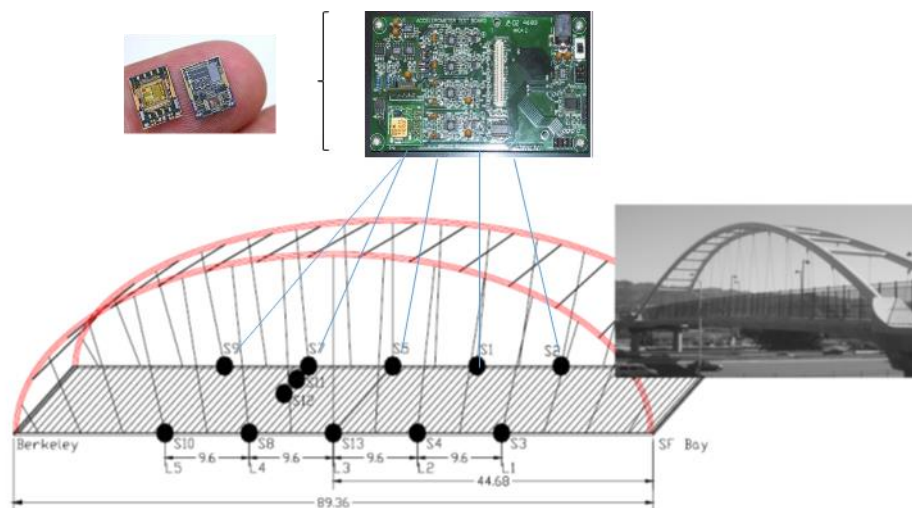


Fig. 1.3 Red de acelerómetros MEMS para la monitorización de un puente (Pakzad, et al., 2005).

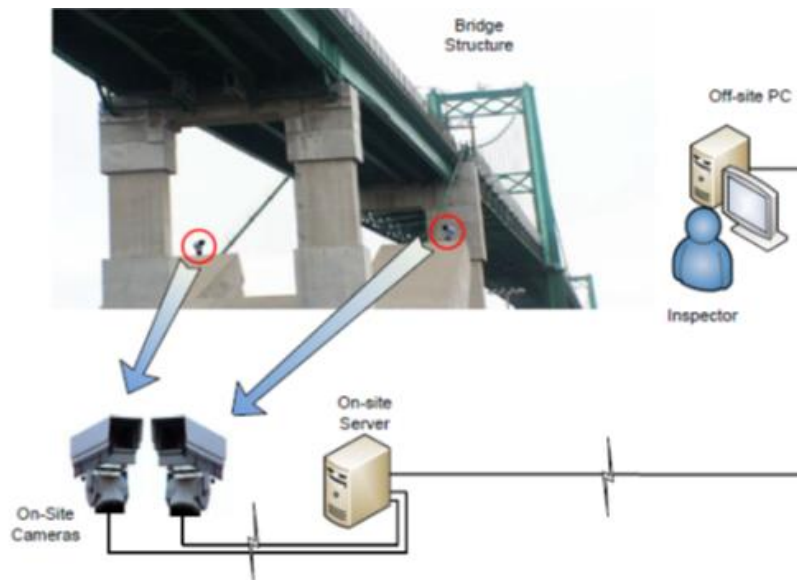


Fig. 1.4 Sistema de cámaras para la inspección de un puente por medio del procesamiento digital de imágenes (Jahanshani, et al., 2011).

Si bien la observación de uno o varios parámetros mediante el uso de distintos instrumentos ha estado presente en el desarrollo de la ingeniería estructural desde el siglo XIX (Billington, 2013), es a partir de la exactitud, precisión y resolución de los actuales sensores, junto con la automatización y velocidad de captura de los sistemas de medición, que el término monitorización de la salud estructural (MSE), se ha acuñado en el ámbito de la ingeniería, como un campo de investigación y aplicación que cada día adquiere mayor importancia.

Bajo este marco de desarrollo tecnológico aplicado al estudio de una gran diversidad de problemas estructurales, la MSE se puede entender como un proceso que a través de la integración de algún tipo de sistema de medición, y de técnicas y algoritmos para procesar y manejar datos, produce información sobre el estado actual de una estructura. Si de forma específica y durante la monitorización de una estructura, se usa adecuadamente un sistema de medición no convencional, se tendrá la posibilidad adquirir información cuantificable y no obtenible con un sistema de medición basado en sensores convencionales. Por lo anterior es cada vez más común, que tanto en pruebas de laboratorio o campo, o también en la monitorización de procesos constructivos o estructuras en servicio, se utilice junto con un sistema convencional con sensores eléctricos, algún tipo de sistema no convencional de medición.

Es así como en este trabajo de investigación, y sin dejar de entender que la monitorización de estructuras de otros materiales es igualmente importante, se plantea el uso de uno de estos sistemas de medición no convencionales, como una alternativa en estudios experimentales de laboratorio y en la monitorización de estructuras de hormigón.

La alternativa de medición que se estudia en este trabajo, consiste en el uso de un sistema óptico-electrónico conformado por un reflectómetro óptico de retrodispersión OBR (por sus siglas en inglés). En este sistema de medición, un cable de fibra óptica es el sensor y no solamente una vía para conducir información. Lo anterior, se traduce en el concepto de sensor de fibra óptica distribuida (SFOD) y en la posibilidad de medir de manera continua la variación de parámetros como la deformación y/o la temperatura en una estructura, en la cual, dicho SFOD se adhiere a su superficie a lo largo de una longitud determinada. En la Fig 1.5 se muestran un sistema OBR conformado por una unidad de interrogación, un cable de fibra óptica que cumple la función de sensor y un ordenador portátil.

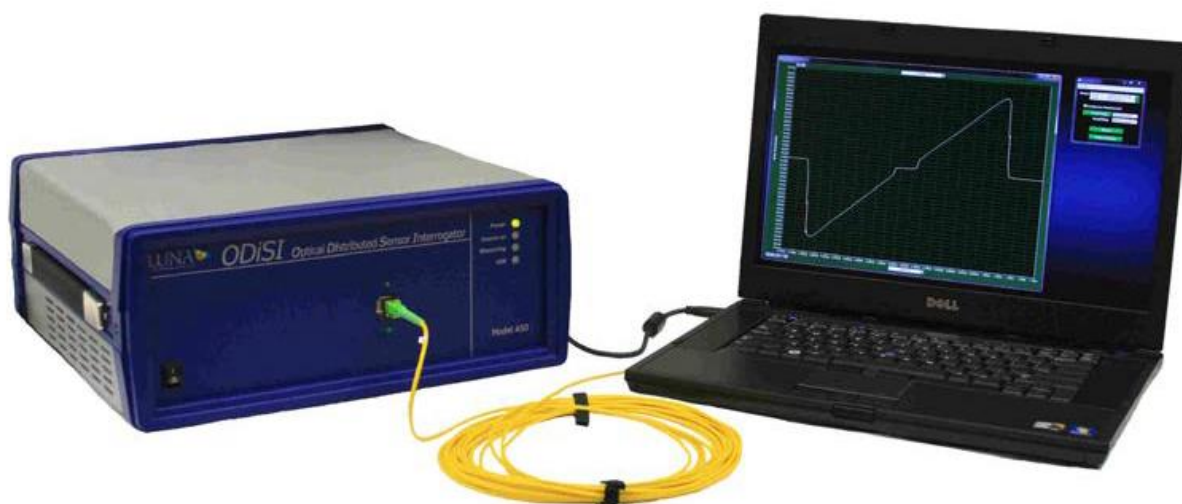


Fig. 1.5 Componentes básicos de un sistema de medición OBR.

La característica principal del conjunto sistema OBR y SFOD que se ha utilizado en el desarrollo de esta tesis doctoral, es su alta resolución espacial. Esta característica, se traduce en la obtención de un gran número de puntos de medición, que con sensores tradicionales y discretos sería muy difícil y costoso de cubrir. En la Fig. 1.6 se muestra en forma esquemática, la forma en la que a través de un SFOD conectado a un sistema de medición OBR, se puede conocer la distribución de las deformaciones en una determinada región de interés.

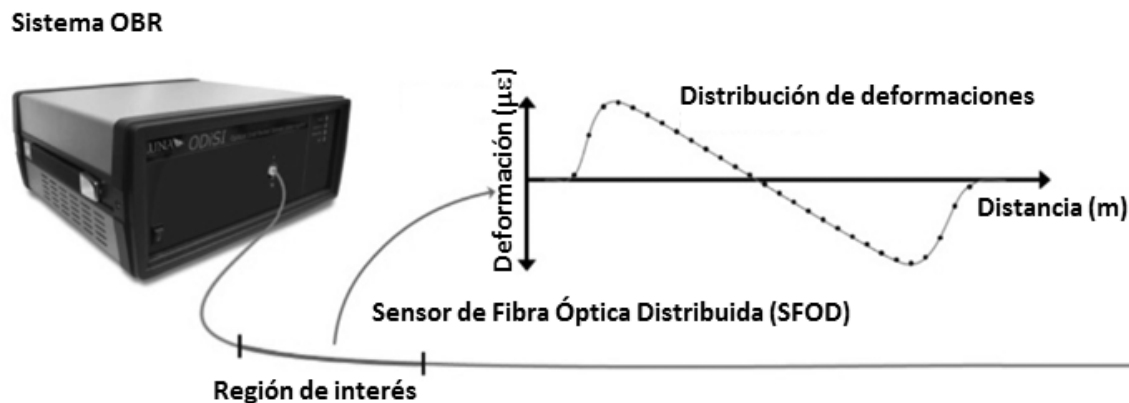


Fig. 1.6. Obtención de la distribución de deformaciones mediante un sistema OBR.

Así, el sistema óptico OBR se convierte en una interesante alternativa para profundizar en el estudio de fenómenos con características muy particulares que tienen una influencia importante en el comportamiento, desempeño y durabilidad de una gran diversidad de estructuras de hormigón, dentro de los cuales destaca la detección oportuna de fisuras. Hay que tener en cuenta que la fisuración es la principal patología presente en las estructuras de hormigón.

El hormigón es el material estructural más ampliamente utilizado en la construcción y su degradación a corto o largo plazo, es uno de los mayores problemas que en términos de conservación de infraestructura, enfrentan muchos países. En este tipo de estructuras, es la aparición de fisuras el principal indicio de la presencia de algún tipo de daño. Usualmente en la práctica, la detección de fisuras en el hormigón se basa en la inspección visual, lo cual consume mucho tiempo, puede resultar muy costosa y se puede convertir en un proceso poco confiable (Zhang, *et al.*, 2008). Sin embargo, si se cuenta con un sistema de medición adecuado, existe la posibilidad de contar con información para inferir la aparición, localización y ancho de fisuras, los cuales son aspectos básicos para la evaluación de la funcionalidad, seguridad y durabilidad en una estructura de hormigón. Por lo anterior, la obtención de la deformación en zonas críticas y la detección temprana y oportuna de fisuras, se debe de considerar como uno de los objetivos primordiales dentro de un proceso de monitorización en estructuras de hormigón.

1.2 Motivación e identificación de la problemática

En el campo de la ingeniería estructural, existen en la actualidad una gran variedad de problemáticas que han impulsado la necesidad de contar con información experimental y cuantificable del comportamiento real que presenta una estructura. Como ejemplos de esta diversidad, destaca el envejecimiento de importantes obras de infraestructura, su refuerzo y rehabilitación. También se pueden mencionar, la ejecución de obras civiles de gran magnitud a través de innovadores procesos constructivos, el uso de nuevos materiales en la construcción, y la generación de información en laboratorio que sirva de apoyo en estudios encaminados a la actualización y mejora de los códigos de diseño estructural. Esta gran diversidad de objetivos ha generado proyectos de monitorización cada vez de mayor alcance, y cuyos requerimientos han hecho evidentes ciertas limitaciones de los sensores eléctricos que comúnmente se han utilizado en la obtención de información. Ejemplos de estas limitaciones son la afectación que sufren los sensores convencionales en su comportamiento en función de los años y las condiciones de uso, su sensibilidad a factores ambientales extremos, su limitación a medir de manera discreta, y en ciertas ocasiones, sus dificultades de instalación y operación, sobre todo en trabajos de monitorización en campo, o bien, en monitorizaciones con un gran número y diversidad de sensores.

Un ejemplo que destaca como una de las principales alternativa ante las limitaciones de la instrumentación convencional, son los SFO. Desde el comienzo de su aplicación hace más de treinta años, estos sensores han sido una opción en los procesos de monitorización de obras civiles. Las ventajas que presentan se pueden resumir en su tamaño reducido, su flexibilidad de uso, su inmunidad a las interferencias electromagnéticas, y su facilidad de colocación y multiplexado. Su aplicación se puede comprobar en una gran diversidad de obras civiles tales como puentes, túneles, plantas de energía, edificaciones y monumentos históricos (Casas, *et al.*, 2003, Li, *et al.*, 2004). En la Fig. 1.7 se muestran algunos ejemplos de SFO que se utilizan en la monitorización de distintas obras civiles.

Sin embargo, la mayoría de los SFO han sido diseñados para medir en forma puntual o discreta. Lo anterior, ha llevado a que la práctica común de monitorización estructural, esté basada en la elección de un cierto número de puntos de medición para su instrumentación. Los puntos elegidos, supuestamente, son representativos del comportamiento de todo un sistema estructural, y con base a los valores obtenidos en ellos se extrapolan los resultados y se hacen extensibles a toda la estructura.



Fig 1.7. Sensores de fibra óptica con aplicación en la monitorización de estructuras.

En el caso de los SFO discretos, destaca el uso de las redes de Bragg. En la aplicación de estos sensores, se aprovechan sus principios de funcionamiento para conformar grupos de redes de Bragg que pueden ser interrogadas al mismo tiempo, y así multiplexar las señales y conformar sistemas de monitorización quasi-distribuidos. En la Fig. 1.8 se muestra un ejemplo de aplicación de redes de Bragg en la monitorización de un túnel.

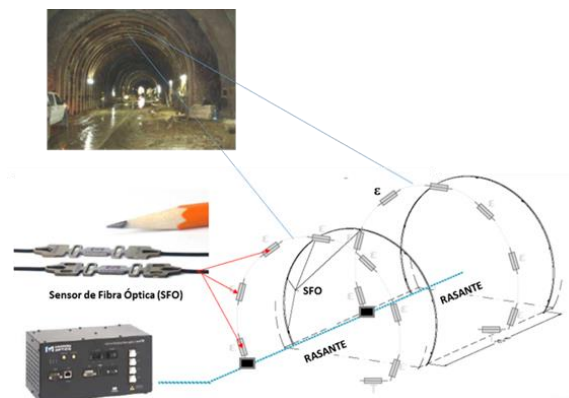


Fig. 1.8 Multiplexado de SFO para la monitorización de un túnel (Notas SHMII-7 Short Course, 2015).

También en este sentido, existen SFO longitudinales que miden la deformación promedio en función de su longitud (Sigurdardottir y Glisic, 2015). Estos sensores, generalmente, se instalan en las zonas críticas de la estructura, en las cuales se prevé que se presentarán esfuerzos de magnitud importante.

Sin embargo, tanto en el uso del multiplexado con redes de Bragg, como con la instalación en zonas críticas de sensores de deformación, siempre existe la posibilidad de perder información relativa al comportamiento y degradación de puntos no instrumentados y que puede resultar importante, sobre todo si está relacionada con el daño que sufre la estructura, perdiendo una valiosa información en cuanto al comportamiento real y posibles redistribuciones de su respuesta.

En el caso específico de las estructuras de hormigón, la identificación del daño tiene características particulares. Debido a su baja resistencia a la tracción, las estructuras de hormigón sufren en forma inevitable de fisuración a lo largo de su vida útil. Por su constitución interna, el hormigón es un material no homogéneo, con un comportamiento anisotrópico, y en el cual la localización de fisuras no se puede conocer *a priori*. Es así, como la aparición de una fisura puede no ser detectada, si el sensor colocado para este propósito no se encuentra precisamente en el lugar de la fisuración. Lo anterior puede considerarse, como una limitación de los sensores discretos en cuanto a la detección de fisuras.

Si uno de los principales objetivos de la MSE es la identificación del daño estructural, la información que se obtiene de un sistema de monitorización es conveniente complementarla con la elaboración de modelos numéricos calibrados con los datos experimentales disponibles, y posteriormente simular la respuesta del sistema estructural para evaluar su estado. En este sentido, si el sistema de monitorización está basado solamente en el uso de sensores discretos, puede resultar limitado. Generalmente, para cubrir esta limitación, se tiene que recurrir a sofisticados algoritmos de identificación cuya efectividad decrece debido a la influencia de información que enmascara el daño (Glisic e Inaudi, 2012).

Por lo anterior, y con el objetivo de aprovechar las grandes ventajas que da el uso de la fibra óptica en la monitorización de estructuras, algunos grupos de investigación han extendido sus trabajos hacia al uso de la propia fibra óptica como sensor y no solamente como conductor de información (Rogers, 1999).

La diferencia cualitativa entre la monitorización con sensores discretos y distribuidos, puede resumirse de la siguiente manera: los sensores discretos miden la deformación o el promedio de la deformación en puntos aislados, mientras que los sensores distribuidos pueden ser instalados en

una estructura de manera tal que su sección transversal o longitudinal puede ser instrumentada en su totalidad. El sensor es sensible en puntos muy cercanos a lo largo de su longitud y puede, en su momento, indicar de manera directa la detección de daño evitando el uso de algoritmos muy sofisticados (Glisic e Inaudi, 2012).

En el caso de las estructuras de hormigón, la presencia de fisuras puede ser el inicio de daños que de no ser tratados a tiempo y en forma adecuada, afectarán la durabilidad y seguridad de la estructura. También es importante mencionar, que para lograr la continuidad de medición con los SFOD, se debe asegurar una adherencia adecuada entre dicho sensor y la sección de la estructura a ser monitorizada.

En el caso específico de las estructuras de hormigón, la superficie generalmente es rugosa y puede presentar irregularidades que dificulten el contacto requerido entre el sensor y la estructura. Por ello, es importante establecer técnicas de pegado eficientes que aseguren la transferencia de deformaciones entre la estructura y el cable de fibra óptica que cumple la función de sensor, incluso en el momento en el cual, la estructura presente fisuración, garantizando la adherencia en zonas de hormigón entre fisuras.

Bajo las condiciones descritas, un sistema de medición con el cual se pueda obtener información experimental relacionada de manera directa con el daño, puede resultar una herramienta muy útil en la evaluación del estado que guarda una estructura.

Así, debido a sus características de continuidad y alta resolución, un sistema OBR con SFOD puede ser una alternativa de monitorización que contribuya en la optimización de la durabilidad de una estructura de hormigón, en la medida en que la detección temprana de daño puede lograrse. También, tanto en estudios experimentales como teóricos, la información que se obtiene con los sistemas de medición discretos, se puede complementar con la información de los SFOD. Por sus características, los sistemas de monitorización OBR, pueden aportar una gran cantidad y riqueza de información en el estudio de problemáticas particulares relacionadas con el comportamiento de las estructuras de hormigón.

Es por lo anterior, que en esta tesis doctoral, se plantea el uso de del sistema OBR en estudios experimentales relacionados con el comportamiento de estructuras de hormigón. Como toda herramienta de medición de uso reciente, el sistema OBR, requiere aún de pruebas que sirvan para profundizar en su conocimiento, certifiquen sus ventajas, identifiquen sus limitaciones, y de ser posible, abran nuevos intereses para desarrollar y diversificar sus aplicaciones.

1.3 Objetivos

En esta tesis doctoral se establecieron dos objetivos fundamentales:

- Mostrar y establecer el potencial de uso de un novel sistema de medición con fibra óptica distribuida, en estudios relacionados específicamente con el comportamiento y la detección del daño en elementos y estructuras de hormigón.
- Elaborar un método de monitorización completo para la detección, localización y cuantificación del daño en elementos estructurales de hormigón. Lo anterior, a través de proponer una metodología de detección de daño, y cuantificación del ancho de fisura basados en información experimental obtenida con un sistema de medición con fibra óptica distribuida.

Para cumplir con los objetivos anteriores, se establecieron objetivos particulares que se definen a continuación:

- Teniendo en cuenta sus principios básicos del funcionamiento, establecer un marco de referencia en torno al funcionamiento de la fibra óptica como sensor, y posteriormente distinguir entre los SFO en general, y el caso particular de los SFOD.
- Conformar un estado del arte de las principales aplicaciones de los SFOD en la ingeniería estructural. Posteriormente, distinguir aquellas relacionadas con estudios en torno al comportamiento de estructuras de hormigón, para identificar sus principales problemáticas.
- Definir un método para calcular anchos de fisura promedio en estructuras de hormigón, sujetas a flexión. El método utiliza únicamente la información experimental que se obtiene de un sistema de medición OBR.
- Extender la aplicación del sistema OBR hacia problemáticas estructurales más complejas. Para ello se tomó como caso de estudio, el comportamiento de vigas de HPP cargadas hasta la rotura por esfuerzo cortante.
- Establecer una metodología basada en los resultados experimentales del sistema OBR, para identificar, localizar y cuantificar la fisuración por cortante.
- Monitorizar de manera temporal, un puente urbano en condiciones parciales de servicio y durante un proceso constructivo de ampliación. Lo anterior con el objetivo de permitir un seguimiento preciso de la seguridad de la obra a lo largo de todo el tiempo de su duración.

- A través del sistema OBR, analizar la información da cada etapa de monitorización, identificando algún cambio significativo y los principales factores que influyen en las deformaciones que se presentan en el puente.
- Con base en las experiencias adquiridas en esta tesis doctoral, proponer futuras líneas de investigación, con el fin de mejorar el uso del sistema OBR, como parte de un sistema de MSE.

1.4 Estructura de la Tesis

Esta tesis doctoral se compone de ocho capítulos. En cada uno de ellos, se trata de cumplir con los objetivos particulares descritos con anterioridad, y se desarrollan de tal forma, que en su conjunto se aborden los objetivos fundamentales establecidos en el apartado 1.3 de este documento.

En el primer capítulo y a manera de introducción, se describe la importancia que actualmente tiene el conocer el uso de nuevos sistemas de medición de parámetros estructurales. Este uso va encaminado a potenciar el campo de la MSE, y a producir información que con anterioridad no podía obtenerse, o solamente se podía conocer en forma limitada. También en este capítulo, se menciona las principales razones por las cuales en esta tesis doctoral se estudian solamente casos de medición en estructuras de hormigón a través del sistema de medición OBR con SFOD. Posteriormente, con base en lo anterior, se establecen los objetivos de esta investigación.

En el segundo capítulo se describen las bases del funcionamiento de la fibra óptica como medio de comunicación y como sensor distribuido en el campo de la ingeniería estructural. Ello con el propósito de mostrar en el tercer capítulo, las principales aplicaciones de los SFOD en el campo de la ingeniería estructural. Aquí, se particulariza en las aplicaciones de estos sistemas, en el estudio de las estructuras de hormigón, y en su potencial como herramienta en la detección de daño.

Los capítulos del cuatro al siete, son el eje central de esta tesis doctoral. En ellos se abordan diferentes aplicaciones del sistema OBR en elementos y estructuras de hormigón instrumentados con sensores eléctricos discretos, y en forma complementaria con un SFOD adherido a su superficie.

En el capítulo cuatro, se utiliza la información obtenida con un sistema OBR durante un ensayo realizado en una investigación doctoral anterior (Villalba 2010), para establecer un método de cálculo del ancho de fisura promedio en un elemento de hormigón armado sometido a flexión.

El capítulo cinco describe en forma general la fisuración por cortante en elementos de hormigón, y los métodos actuales más comunes para determinar experimentalmente el ancho de fisura. Con base en las características de la información que ofrecen los SFOD, se establece un método para detectar, localizar y cuantificar el ancho de fisura promedio en estructuras de hormigón sujetas a esfuerzos cortantes.

En el capítulo seis se aplica el método de monitorización propuesto anteriormente, en una serie de ensayos experimentales con el objetivo de verificar la metodología propuesta. En forma específica, se hace por medio de una serie de ensayos en tres vigas de HPP. A través del manejo y análisis de una gran cantidad de información obtenida con el sistema OBR, se conforma un procedimiento para analizar el comportamiento de las zonas sujetas a fisuración por esfuerzo cortante en las vigas ensayadas y la evolución de daño, a través de la detección, localización y cuantificación del ancho promedio de fisuras. En la parte final de este capítulo, el método para el cálculo de ancho de fisura a flexión, se utiliza en una viga HPP, ensayada previamente a cortante sólo en una parte de su longitud total, y que, por lo cual, presentaba daño previo a su instrumentación y posterior ensayo a flexión.

El capítulo siete describe la experiencia obtenida en la monitorización temporal de un puente urbano en proceso de adecuación funcional. En esta caso, el sistema OBR con SFOD, fue utilizado para obtener durante un periodo de casi ocho meses, la variación de las deformaciones que sufrió el puente durante el tiempo que duro su ampliación. El puente se mantuvo en servicio en forma parcial, y estuvo bajo la influencia de una diversidad de factores, dentro de los que destacan los cambios por temperatura.

Por último, en el capítulo ocho se describen las principales conclusiones de este trabajo, las cuales en forma general se pueden dividir en dos tipos. Aquellas referentes al uso del sistema OBR como herramienta en la monitorización de estructuras de hormigón, y las conclusiones referentes al análisis del comportamiento de los elementos estructurales de hormigón monitorizados. Finalmente, con base a las experiencias obtenidas en este trabajo, se proponen algunos estudios y líneas de investigación futuras, con el propósito de seguir profundizando y mejorando el conocimiento en el tema de este trabajo.

CAPÍTULO 2

BREVE RESEÑA HISTÓRICA Y FUNDAMENTOS DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA DISTRIBUIDA (SFOD)

2.1 Introducción

En este capítulo se hace una breve reseña histórica acerca del desarrollo de la fibra óptica, primero como medio conductor de luz y productor de distintas formas de iluminación. Posteriormente, se mencionan las principales motivaciones que dieron origen al uso de la fibra óptica en el campo de la medición de parámetros estructurales. Bajo este marco se describen los principios físicos en los que se basa el funcionamiento de una fibra óptica para transmitir información. A su vez, y como consecuencia del desarrollo y diversidad de SFO que se utilizan actualmente en la ingeniería estructural, se mencionan algunas de las principales formas para clasificarlos. Aquí, se hace énfasis en la clasificación de SFO de acuerdo a su capacidad para medir parámetros estructurales en función de la longitud propia del sensor. Lo anterior con el objeto de dar claridad al término distribuido que se aplica en la denominación del SFOD que se utiliza en este trabajo. Una vez definidos los SFOD, se distinguen las dos principales técnicas que actualmente se aplican en la obtención de información estructural a través de este tipo de sensores. Dentro de estas técnicas, la resolución espacial es uno de los parámetros que adquiere mayor importancia, ya que define en gran medida el potencial de uso que tendrá un sistema con SFOD respecto al tipo de monitorización que se necesite realizar y la riqueza de información que se pretenda obtener. Ello se hace con el propósito de destacar las principales características del sistema OBR, cuya aplicación en la monitorización de estructuras de hormigón, es el objetivo principal de esta investigación.

2.2 La fibra óptica como medio de iluminación, telecomunicación y como sensor

2.2.1 Breve reseña histórica

El origen de cualquier sensor óptico actual, se encuentra en investigaciones que datan de la década de 1950 y que están relacionadas con la búsqueda de transferencia de información de manera rápida y a grandes distancias a través del uso de la luz. Antes, en una primera etapa durante la década de 1930, Heinrich Lamm, un estudiante de medicina en Alemania, desarrolló la idea y con

ello sentó las bases para guiar la luz a través de conductos esbeltos, con el propósito de iluminar y fotografiar dentro del cuerpo humano (Hetch, 2006 y Ansari, 2009).

Esta primera etapa terminó por reflejarse en el campo de la medicina, con la aplicación sumamente especializada de pequeños filamentos cristalinos como conductores de luz en los circuitos internos de instrumentos médicos para observar en el interior del estómago humano y en el desarrollo de microscopios ópticos (Ansari, 2009 y Rogers, 1999).

Posteriormente, en 1956, Lawrence E. Curtiss, estudiante de física de la Universidad de Michigan crea las primeras fibras ópticas utilizando sílice o materiales plásticos para su fabricación (Hatch, 2006). El gran mérito de su propuesta, es haber diseñado un revestimiento para la fibra óptica, con un índice de refracción menor que el del núcleo de cristal de la propia fibra. Con esta variante, se aseguraba que la luz viajara en su totalidad dentro del núcleo de la fibra, minimizando las pérdidas por refracción, es decir, se conseguía producir una reflexión interna total de la luz.

También, debido a su fragilidad y con el fin evitar su fractura, las fibras ópticas comenzaron a fabricarse con una segunda cubierta protectora. Actualmente, una fibra óptica común consta de un núcleo, un revestimiento, y una cubierta protectora con diámetros de 5, 125 y 250 μm , respectivamente.

Es así, como técnicamente se establecen los primeros procedimientos para que la luz y por tanto la información, pudieran ser conducidas de manera más directa y controlada en distancias cortas de transmisión a través de esbeltos cables de fibra óptica. Sin embargo, hasta ese momento de su desarrollo, la tecnología de transmisión de información basada en el uso de cables de fibra óptica, no resultaba una buena alternativa para cubrir grandes distancias. De manera casi inmediata, se comprobó que debido a su naturaleza y a la forma tan dispersa de propagación de la luz en la atmosfera, la luz sufría de gran atenuación y enormes pérdidas de potencia conforme las distancias a cubrir crecían. La comunicación con sistemas ópticos resultaba defectuosa aun para distancias menores a 1 km, sobre todo con la presencia de nieve o lluvia. En los sistemas ópticos existentes en ese entonces, la atenuación era alrededor de 250 dB/km (Rogers, 1999).

Poco tiempo después, fue posible contar por primera vez con una fuente de frecuencias ópticas que pudiera competir de manera aceptable, con sistemas de transferencia de información que funcionaban con frecuencias de radio o microondas. Dicha fuente óptica fue el láser, cuya principal característica es la producción de haces de luz monocromáticos, lo cual se reflejó en una disminución considerable de la dispersión de la luz, dentro de los cables de fibra óptica.

De igual manera, en 1966 se demostró de manera convincente, que la atenuación en las fibras ópticas se debían a impurezas removibles (iones de metales pesados), producto de su fabricación. A partir de aquí, se inició una intensa actividad para crear métodos de remoción de dichas impurezas. En 1970 se consigue tener fibras ópticas con pérdidas de 20 dB/km. A mediados de esta misma década, la telecomunicación con fibras ópticas se vuelve competitiva a un nivel comercial con respecto a los sistemas basados en el uso de cables coaxiales. Actualmente, los sistemas de telecomunicación con fibras ópticas son de los más óptimos en el mercado. Hoy, se encuentran disponibles fibras ópticas con una atenuación de solamente 0.15 dB/km (Rogers, 1999), y que son comúnmente utilizadas como canales de comunicación, donde las ondas de luz se propagan a grandes distancias.

Así, en el campo de las telecomunicaciones, la fibra óptica es aislada de perturbaciones externas por medio de una serie de protecciones para optimizar su funcionamiento. Sin embargo, mediante la manipulación de factores ambientales que influyen en las propiedades de la luz que viaja a través de la fibra, ésta puede ser utilizada como medio para detectar e incluso medir perturbaciones externas en forma discreta o distribuida.

Respecto a los primeros sensores de fibra óptica, es la década de 1970 el periodo en el cual las fibras ópticas comienzan a ser consideradas con un potencial para ser utilizadas como sensores y no sólo como medio para transportar señales. Las primeras investigaciones en torno a la capacidad de las fibras ópticas para medir campos de deformación en la mecánica estructural pueden ser atribuidas a Butter y Hocker en 1978 (Ansari, 2009). Surgen así los primeros sensores o galgas extensométricas de fibra óptica, y sus aplicaciones en el estudio de materiales compuestos dentro de la industria aeronáutica. Sin embargo, es a finales de la década de 1980, cuando dentro de la ingeniería civil se inicia la experimentación con SFO y materiales de construcción (Ansari, 1990).

2.3 Fundamentos de los Sensores de Fibra Óptica

2.3.1 Los Sensores de Fibra Óptica (SFO)

Cualquier SFO está basado en el principio de propagación de la luz a través de un medio. En el caso específico de los SFO, ese medio es un cable que tiene generalmente un núcleo de 9 μm de diámetro con revestimiento de 125 μm en promedio y que es similar al diámetro de un cabello humano.

Este cable está fabricado de una aleación de cristal, generalmente sílice, y a través de él la luz viaja y transporta una gran cantidad de información a distancias considerables y con muy pocas pérdidas. Por lo anterior, se puede afirmar que en cualquier SFO, los dos elementos fundamentales son el núcleo y el revestimiento. El núcleo es la parte interna de la fibra, la cual guía y conduce la luz, el revestimiento rodea completamente al núcleo. En muchas ocasiones por su uso y para dotarlos de una mejor protección ante factores externos que puedan dañarlos, los cables de fibra óptica requieren de una cubierta protectora, cuyo diámetro puede variar de los 250 a los 900 μm . En la Fig. 2.1 se pueden observar los componentes típicos de uno de estos cables.

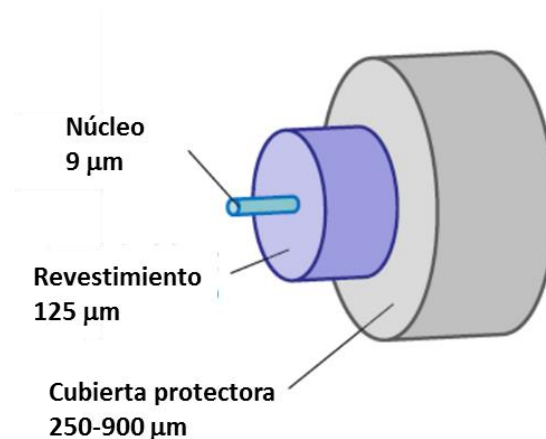


Fig. 2.1 Sección transversal de un cable de fibra óptica.

La luz es guiada en el núcleo de la fibra por reflexión interna, la cual se produce gracias a que el índice de refracción del núcleo es mayor que el del revestimiento. Así, la luz que viaja en el núcleo y que choca con un ángulo establecido en la frontera con el recubrimiento, es confinada por reflexión interna total, como se muestra en la Fig. 2.2 (Hetch, 2006).

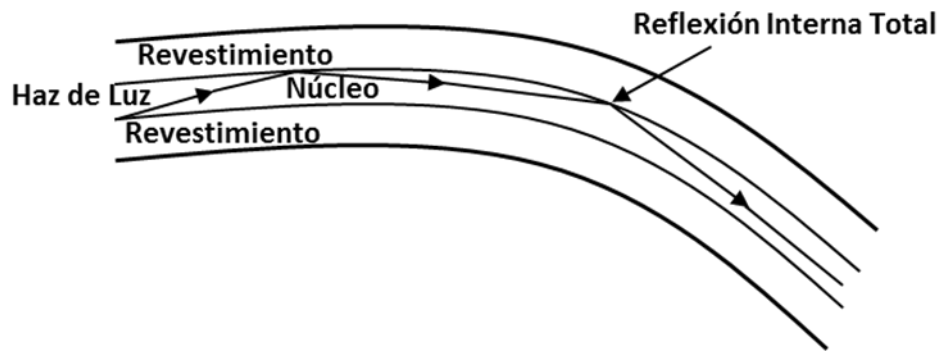


Fig. 2.2 Trayectoria de la luz y la reflexión interna total en el núcleo de una fibra óptica.

A partir de los fundamentos anteriores, los SFO se pueden clasificar de diversas maneras. Dicha diversidad responde al enfoque bajo el cual los SFO pueden ser estudiados. Dichas clasificaciones serán mencionadas, pero para los fines que convienen a este trabajo, la clasificación de los SFO estará basada en la capacidad del sensor para medir dentro de una longitud determinada.

Generalmente, la luz que viaja dentro del núcleo de un cable de fibra óptica, es un láser monocromático. En el proceso descrito anteriormente, la atenuación es una de las propiedades más importantes de una fibra óptica, que influyen en la transmisión de la luz. Por lo tanto, si una fibra óptica se utiliza como un canal de comunicación, la atenuación debe ser minimizada. De manera contraria, si la fibra óptica se utiliza como un sensor, dicha atenuación puede ser utilizada. Existen una gran variedad de fuentes de atenuación, dentro de las cuales la dispersión es la más importante para entender las diferentes técnicas en las que se basan los SFOD.

2.3.2 Dispersión de la luz

En un sentido general, la dispersión es la interacción de la luz con un medio óptico. En una fibra óptica, dicho medio es el núcleo de una fibra óptica.

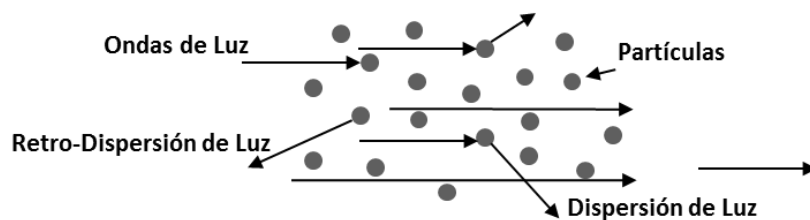


Fig. 2.3 Dispersión y retro-dispersión en el núcleo de una fibra óptica.

Aquí, la dispersión ocurre en condiciones bajo las cuales las propiedades del núcleo son modificadas por la presencia de las ondas de luz que inciden dentro de él (Boyd, 1992). Cuando una fuente de luz monocromática conformada por ondas continuas se lanza a través de uno de los extremos de un cable de fibra óptica, un alto porcentaje de esas ondas de luz continúa su viaje hacia el otro extremo. Sin embargo, el porcentaje de luz restante, choca con las partículas o dopantes que conforman la fibra óptica y algunas de esas ondas se dispersan en diferentes direcciones. La Fig. 2.3 muestra, en forma esquemática, cómo estas perturbaciones moleculares entre las ondas de luz y los dopantes se producen dentro del núcleo de una fibra óptica.

Para analizar la dispersión dentro de la fibra óptica, se puede recurrir a la dualidad onda-partícula de la luz. Ahora, la luz está conformada por fotones o paquetes de luz que contienen cierta cantidad de energía y tienen asociada una frecuencia determinada. Cuando la dispersión ocurre, cierto número de fotones regresa hacia la fuente de luz y se produce lo que se conoce como retro-dispersión (Fig. 2.3). En este proceso interno, se da un intercambio de energía y los fotones mantienen o varían su frecuencia. Si las frecuencias no presentan variación, se produce una dispersión elástica, pero si existe una variación en la frecuencia, se presenta una dispersión inelástica.

En este proceso de retro-dispersión, tres tipos distintos de fenómenos físicos se pueden presentar en el núcleo de una fibra óptica: dispersión de Rayleigh que es una retro-dispersión elástica, y las retro-dispersiones inelásticas conocidas como de Raman y Brillouin. Debido a que el desarrollo de los sistemas de monitorización con SFOD está basado tanto en la retro-dispersión de Rayleigh como en la de Brillouin, a continuación solamente se describen estos dos casos.

2.3.3 Dispersión de Rayleigh

La dispersión de Rayleigh se produce por el choque entre el haz de luz incidente y partículas de una longitud de onda menor. Este choque de partículas es aleatorio y solamente produce variaciones microscópicas en el índice de refracción de la luz que viaja dentro del núcleo de la fibra (Yu y Yin, 2002). Debido a lo anterior, la dispersión de Rayleigh se considera como un fenómeno quasi-elástico o lineal (Boyd, 1992), el cual presenta la misma frecuencia (ν_0) entre la luz incidente y los fotones que viajan nuevamente hacia el extremo inicial de la fibra, como se muestra en la Fig. 2.4.

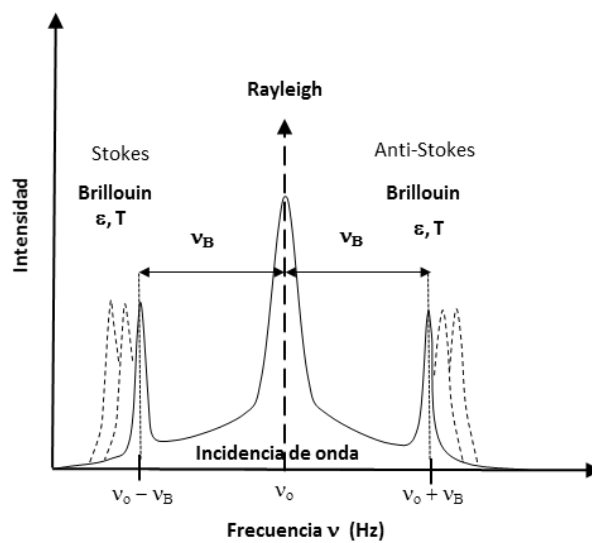


Fig. 2.4 Componentes espectrales de la frecuencia de Brillouin y Rayleigh.

También en esta figura, se aprecia como la intensidad de la dispersión de Rayleigh es el fenómeno predominante en la dispersión de la luz. La retro-dispersión de Rayleigh tiene una intensidad que es aproximadamente 20 dB mayor que la retro-dispersión de Brillouin (Horiguchi, et al 1995).

2.3.4 Dispersión de Brillouin

La dispersión de Brillouin es el resultado de la interacción entre la luz y el sonido (Boyd, 1992). Esto sucede cuando la intensidad de la luz alcanza un nivel suficiente para generar efectos térmicos en el núcleo de la fibra. En ese momento, la densidad del material de fibra cambia y se producen pequeñas ondas acústicas en el interior del núcleo de la fibra (Hetch, 2006 y Boyd, 1992). Estas ondas acústicas con una frecuencia (ν_a) viajan a lo largo del núcleo de la fibra óptica a la velocidad del sonido y en este recorrido interfieren con los fotones que conforman la luz. En esta interacción se producen cambios, uno de los cuales es la variación del índice de refracción de la luz. Dicha variación adquiere una forma periódica debido a la difracción que se produce por la diferencia de frecuencias a la que viajan los fotones (ν_o) y a la que viajan las ondas acústicas (ν_a). Esta interacción se puede idealizar como una difracción móvil de Bragg (Zeni, 2009), como se representa en la Fig. 2.5. Las fluctuaciones de los índices de refracción resultantes se conocen como retro-dispersión de Brillouin.

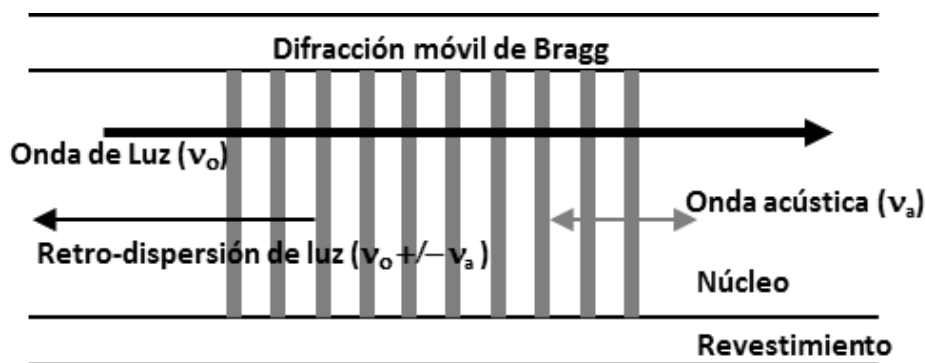


Fig. 2.5. Retro-dispersión de Brillouin.

Esta retro-dispersión se considera un fenómeno inelástico, y toma la forma un desplazamiento denominado (ν_B) en el dominio de la frecuencia con respecto a la frecuencia original (ν_o), como se puede observar en la Fig. 2.4, en la que se distinguen los componentes espectrales de la frecuencia de Brillouin y Rayleigh.

Este desplazamiento en la frecuencia, se traduce tanto en un aumento como en una disminución de la frecuencia de la luz. El desplazamiento de la frecuencia hacia un valor más alto, se denomina efecto anti-Stokes ($\nu_o + \nu_B$), de manera contraria, la disminución de la frecuencia ($\nu_o - \nu_B$) se denomina efecto Stokes, como se observa en la Fig. 2.4. De lo anterior y basados en la Fig. 2.5, se

deduce que el desplazamiento de la frecuencia de Brillouin (ν_B) es igual a la frecuencia de la onda acústica (ν_a).

El desplazamiento de la frecuencia de Brillouin (ν_B) está dado por la ecuación (2.1), donde n es el índice de refracción, λ es la longitud de onda de la luz, y V_o es la velocidad de la onda acústica, la cual se obtiene por la ecuación (2.2). V_o es función del módulo de Young E y de la densidad del material del núcleo de la fibra óptica ρ .

$$\nu_B = \frac{2nV_o}{\lambda} \quad (2.1)$$

$$V_o = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.2)$$

Cuando una fibra óptica es perturbada externamente, la velocidad de las ondas acústicas dentro del núcleo cambian, y por la misma razón, la frecuencia de Brillouin también cambia. Cuando en las condiciones anteriores ocurre la dispersión de Brillouin, el fenómeno se conoce como retro-dispersión de Brillouin espontánea. Cuando en forma contraria, la luz es utilizada para generar dispersión de Brillouin, el proceso se conoce como retro-dispersión estimulada. En ambos casos, la característica más relevante con relación al desarrollo de los SFOD es que el desplazamiento de la frecuencia de Brillouin (ν_B) depende de las variaciones de temperatura y deformación de la fibra óptica.

2.4 Clasificación de los SFO en función de su rango de medición

Los SFO se clasifican principalmente en tres grupos: discretos, cuasi-distribuidos, distribuidos.

2.4.1 SFO discretos

Los Sensores de Fibra Óptica discretos miden la deformación en un solo punto a lo largo de un cable de fibra óptica. Uno de los principales ejemplos de este tipo de sensores, son las rejillas de Bragg, las cuales tienen una precisión en la medición de las deformaciones de aproximadamente $1 \mu\epsilon$. Sin embargo, al medir solamente las deformaciones en un único punto, en su aplicación, siempre existe la posibilidad de perder información importante cuando se desconoce a priori la localización de puntos con deformaciones importantes.

2.4.2 SFO cuasi-distribuidos

Las técnicas de medición de deformaciones basadas en el uso de SFO cuasi-distribuidos, se pueden conformar principalmente de dos maneras distintas. La primera está basada en la posibilidad de multiplexión que tiene algunos SFO. Dentro de los SFO que pueden ser multiplexados, se encuentran las regillas de Bragg, que han sido descritas en la sección anterior.

En un cable de fibra óptica, existe la posibilidad de conectar una serie de rejillas de Bragg. Estas, al ser conectadas en serie, se pueden distribuir físicamente dentro de una longitud determinada y conformar lo que se conoce como redes de Bragg. Lo anterior permite tener la posibilidad de cubrir una sección de sistema estructural a monitorizar con una solo cable de fibra óptica, y un cierto número de puntos de medición cuasi-distribuidos en la sección que se desea monitorizar.

La segunda técnica de medición con SFO cuasi distribuidos consiste en el uso de sensores de deformación de gran rango de medición. Estos sensores de deformación tienen una longitud que varía entre los 10 y 15 cm, y de los cuales se obtiene la deformación promedio dentro de su longitud. Estos sensores se pueden colocar en serie, o bien en zonas donde se prevé que pueden presentarse esfuerzos importantes.

Esta técnica está limitada al número de sensores que pueden ser instalados en un cable de fibra óptica y finalmente no producen una medición distribuida en forma continua.

2.4.3 Sensores de fibra óptica distribuidos (SFOD)

Los SFOD, están basados en la medición de la luz que se envía a través de un cable de fibra óptica, y que se refleja de vuelta hacia la fuente de luz. La posibilidad de poder medir este fenómeno, es la única forma que se tiene para poder realizar mediciones a lo largo de toda la longitud de una fibra óptica. Así, las tecnologías con las que se tiene la posibilidad de capturar este fenómeno conocido como retro-dispersión, conforman los sistemas de fibra óptica distribuidos.

Las mediciones que se realizan a través de cualquier tipo de SFOD son posibles debido a las atenuaciones y dispersiones que se presentan cuando un haz de luz viaja dentro del núcleo de un cable de fibra óptica. Los primeros SFOD estuvieron basados solamente en la medición de la atenuación, específicamente, en la medición de las atenuaciones producidas por efectos externos

y captadas en el proceso de retro-dispersión de Rayleigh (Yu y Yin, 2002). Posteriormente, se desarrollaron sistemas opto-electrónicos con SFOD capaces de medir deformaciones y variaciones de temperatura. Dichos sistemas están basados en la medición de fuentes intrínsecas de retro-dispersión de Brillouin. A partir de estos desarrollos se han puesto en práctica sistemas de medición con SFOD en diferentes procesos de monitorización de estructuras. Sin embargo, en procesos de monitorización en los que la identificación de daño es el principal objetivo, los SDOF basados en la retro-dispersión de Brillouin presentan algunas limitaciones. Básicamente, la principal limitación es el límite de su resolución espacial. Para cubrir esta limitación, recientemente se han desarrollado SFOD que usan la retro-dispersión de Rayleigh, la interferometría de alta precisión y la técnica conocida como reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia. La característica principal de estos sistemas es su alta resolución espacial. Actualmente, en función de los principales objetivos de una monitorización hay una gran diversidad de SDOF que pueden ser aplicados. A continuación se describen y comparan las principales características de estos sistemas de medición.

En forma paralela y bajo una variante conceptual en su desarrollo tecnológico, actualmente también se fabrican sensores de fibra óptica con la posibilidad de dar información a un nivel local de la estructura. Lo anterior, con el objetivo de contar con sensores que localicen de manera muy precisa, fenómenos estructurales de tipo local, como el nacimiento de fisuras, la presencia de corrosión y las variaciones de la temperatura. Es así, como actualmente se conjuntan dentro de los SFOD, dos posibilidades de monitorización. Ambas pueden ser aplicadas de acuerdo a los objetivos que se busquen cubrir durante un proceso de medición de parámetros estructurales. A continuación se presenta el estado en que actualmente se encuentran ambas variantes de medición.

2.5 Técnicas de monitorización con SFOD

2.5.1 Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (OTDR, Optical Time Domain Reflectometer)

En un sistema de medición basado en el uso de un OTDR, la atenuación es el único parámetro medible y su principio de funcionamiento es relativamente simple. Fue propuesto por Barnosky y Jensen en 1976 (Barnosky y Jensen, 1976, Palmieri y Shenato, 2013). Básicamente un OTDR traza la atenuación en función del tiempo, de un pulso de luz que viaja dentro de un cable de fibra óptica. Dicha atenuación ocurre debido a la retro-dispersión de Rayleigh que se produce debido a las variaciones microscópicas y aleatorias en el índice de refracción de la luz. Como se muestra en la

Fig 2.6, cuando un pulso de luz es lanzado en uno de los extremos de un cable de fibra óptica bajo prueba (FBP) sin perturbaciones externas, la atenuación que se presenta decae en forma exponencial con respecto al tiempo y debido a pérdidas intrínsecas en la fibra (Yu y Yin, 2002). Ésta es una de las principales razones por las cuales el OTDR es considerado como un sistema de retro-dispersión lineal. Posteriormente, cuando la FBP está sujeta a perturbaciones externas en una zona específica, la atenuación no decaerá en la forma exponencial antes descrita, sino que aparecerá un cambio repentino en la curva que coincidirá con la zona sujeta a perturbaciones externas.

En forma general, el OTDR es un instrumento versátil y de un uso amplio en la detección de fallas e imperfecciones en grandes líneas de comunicación a través de cables de fibra óptica que presentan longitudes incluso de kilómetros (Hetch, 2006).

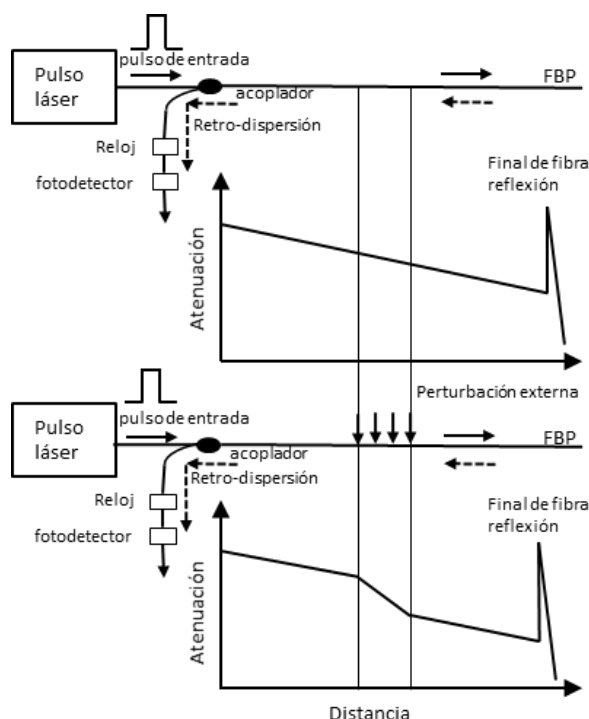


Fig 2.6 Principio de funcionamiento de un sistema OTDR.

Como sistema de monitorización estructural y debido a su resolución espacial de 1 m, las aplicaciones de los sistemas OTDR son limitadas. Sin embargo, como su operación requiere de procesos muy simples, los sistemas OTDR han sido el punto de partida en el desarrollo de sistemas con SDOF con una mayor resolución espacial y precisión. Por lo anterior, sus principales componentes y fundamentos operativos se resumen a continuación.

Como se muestra en la Fig. 2.6, un sistema OTDR incluye básicamente una fuente luminosa que produce un pulso, un acoplador, un fotodetector y un reloj. La fuente luminosa envía pulsos, generalmente pulsos tipo laser que tienen una duración o ancho específico. Este ancho depende de

la aplicación y de las diferentes condiciones en las que se requiera realizar una medición. Los pulsos láser son enviados al acoplador, en el cual, los pulsos sólo viajan en una dirección específica dentro de la fibra óptica bajo prueba. Dentro de la fibra se produce la retro-dispersión de Rayleigh, y algunos pulsos regresan hacia el acoplador, pero esta vez son dirigidos al fotodetector.

El fotodetector mide la atenuación de los pulsos láser que llegan desde la fibra óptica en prueba. Aquí, los pulsos se convierten a su correspondiente nivel eléctrico. Es también en esta etapa del proceso, en la que un reloj de alta precisión se utiliza para medir la diferencia en tiempos cuando los pulsos son lanzados desde la fuente y cuando los pulsos que regresan debido a la retrodispersión, son detectados. Este viaje de ida y vuelta del pulso laser multiplicado por la velocidad de la luz dentro de la fibra, se usa para calcular la distancia de ida y vuelta (Palmieri y Shenato, 2013). Finalmente, como se muestra en la Fig. 2.6 se obtienen las gráficas distancia-atenuación.

Como se ha mencionado anteriormente, el uso de un sistema OTDR en la monitorización de la salud estructural es limitado, su mayor restricción es la resolución espacial ΔZ . Si la resolución espacial se entiende como la menor distancia a la que se puede medir entre dos puntos (Yu and Yin, 2002), en un OTDR la resolución espacial es del orden de metros. La resolución espacial en un OTDR, puede expresarse de acuerdo a la ecuación (2.3), donde c es la velocidad de la luz, n es el índice de refracción de la fibra y τ es el ancho del pulso de luz

$$\Delta Z = \frac{c\tau}{2n} \quad (2.3)$$

Si se sustituyen valores típicos, $c = 3 \times 10^8$ m/s, $n = 1.5$ y $\tau = 10^{-8}$ s, se obtiene $\Delta Z = 1$ m, que es la máxima resolución espacial para un sistema OTDR. De manera ideal, si en la ecuación (2.3), se reduce el ancho del pulso de luz τ , la resolución espacial se incrementará. Sin embargo, esta reducción puede ocasionar efectos no lineales y de distorsión en la señal, debido a que la relación señal-ruido disminuye (Palmieri y Shenato, 2013). Para determinadas requerimientos de medición, como puede ser el caso de estructuras de hormigón en las que el ancho de fisura es de un orden milimétrico, la resolución espacial de 1 m resulta insuficiente. Sin embargo, como se describirá más adelante, una de las primeras aplicaciones de los OTDR en el campo de la ingeniería estructural, fue la detección de fisuras en elementos de hormigón (Rossi y LaMaou 1989, Zako, *et al.*, 1995). Finalmente, también debe mencionarse como otra limitación importante, que a través de un OTDR no es posible la obtención directa de la deformación o la variación de la temperatura.

2.5.2 Reflectómetro Óptico de Brillouin en el Dominio del Tiempo (BOTDR Brillouin Time Domain Reflectometer)

En 1989, Hiriguchi, Kurashima y otros autores, descubrieron la dependencia entre los efectos térmicos, las deformaciones tensionales y la variación de la frecuencia de Brillouin en fibras ópticas de sílice (Horiguchi, *et al.*, 1989), Kurashima, *et al.*, 1990). El descubrimiento de este fenómeno marca el inicio en el desarrollo de SFOD capaces de medir las deformaciones y la variación de la temperatura en función de la retro-dispersión de Brillouin. La técnica conocida como BOTDR se basa en la evolución espectral de la retro-dispersión espontánea de Brillouin, descrita en la sección 2.3.4. En este caso, se emplea una técnica similar al OTDR, pero tanto la temperatura como las deformaciones son parámetros que pueden ser medidos directamente. En este sentido, muchos sistemas han sido desarrollados por diversos grupos de investigación (Hiriguchi, *et al.*, 1995, Horiguchi, *et al.*, 1993, Niklés, *et al.*, 1997, Parker, *et al.*, 1997, Ohno, *et al.*, 2001). En la Fig. 2.7, se muestra una configuración típica de un sistema BOTDR. La principal tarea de este sistema es adquirir la variación de ν_B denominada como frecuencia de Brillouin (Fang, *et al.*, 2012), a través de un pulso de luz que se lanza dentro de una FBP para generar un espectro de retro-dispersión espontánea de Brillouin como el que se muestra en la Fig. 2.4.

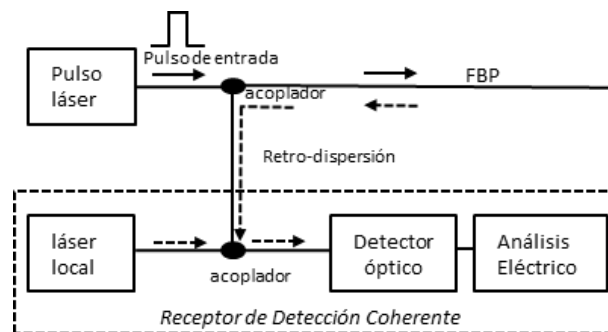


Fig 2.7 Configuración típica de un sistema BOTDR.

En esta figura se puede observar que la retro-dispersión de Brillouin es pequeña y de baja potencia, lo cual induce un efecto negativo en la calidad de la medición. Para compensar esta limitación, se utiliza lo que se conoce como una detección coherente (Galindez-Jamioy, *et al.*, 2012). El principal objetivo de esta detección coherente es eliminar el ruido para obtener una mejor calidad en la información obtenida (Kurashima, *et al.*, 1997).

Cuando un pulso de luz viaja en el núcleo de una fibra óptica que está sujeta a efectos externos, se producen cambios de temperatura y deformaciones en la longitud de la fibra, los cuales son

captados por el sistema. Debido a estos efectos, la frecuencia de Brillouin ν_B sufre cambios, los cuales están en proporción a la variación de la temperatura y la deformación. Estos cambios se muestran con líneas discontinuas en la Fig. 2.4. Así, los sistemas BOTDR presentan una ventaja de origen práctico para efectos de monitorización de la salud estructural con respecto a los sistemas OTDR, ya que con los primeros la variación de la temperatura y la deformación se obtiene directamente.

Lo anterior es posible debido a que existe una relación lineal entre la retro-dispersión de Brillouin, y la variación de la temperatura y la deformación. Estas relaciones se expresan por las ecuaciones (2.4) y (2.5) (Horiguchi, *et al.*, 1995, Zhang y Wu, 2008).

$$\nu_B(T_0, \varepsilon) = C_\varepsilon(\varepsilon - \varepsilon_0) + \nu_{B0}(T_0, \varepsilon_0) \quad (2.4)$$

$$\nu_B(T, \varepsilon_0) = C_T(T - T_0) + \nu_{B0}(T_0, \varepsilon_0) \quad (2.5)$$

donde, C_ε y C_T son coeficientes de deformación y temperatura respectivamente, y T_0 y ε_0 son la temperatura y la deformación correspondientes a la frecuencia de Brillouin ν_B . Por otra parte, la posición de la deformación en la fibra se determina a través del intervalo de tiempo que existe entre el lanzamiento del pulso de luz y la luz que regresa producto de la retro-dispersión. Con relación a la resolución espacial, ésta se determina de forma similar que en los sistemas OTDR, y generalmente es de 1 m. Las principales aplicaciones de los sistemas BOTDR en la monitorización de la salud estructural se encuentran en puentes de mediana longitud (Bastiniani, *et al.*, 2005a, Bastiniani, *et al.*, 2005b).

2.5.3 Análisis Óptico de Brillouin en el Dominio del Tiempo (BOTDA Brillouin Optical Time Domain Analysis).

El Análisis Óptico de Brillouin en el Dominio del Tiempo se basa en la retro-dispersión de Brillouin estimulada. Dicha estimulación se produce cuando a través de los dos extremos de un cable de fibra óptica, se lanza un pulso de luz con una frecuencia ν_p y una onda laser continua (OC) por el otro extremo, como se observa en la Fig. 2.8. La onda laser es lanzada por un extremo a una cierta frecuencia $\nu_{cw} = \nu_p \pm \nu_{B0}$, que corresponde a la frecuencia de Brillouin desplazada la frecuencia del pulso de luz del otro extremo.

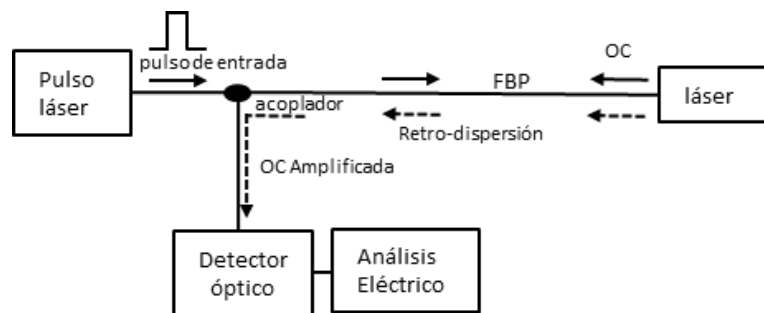


Fig 2.8 Configuración típica de un sistema BOTDA.

La interacción entre las dos señales produce un efecto de retro-dispersión con una mayor eficiencia, lo que se traduce en una transferencia de energía del pulso de luz hacia la onda laser continua (Glisic e Inaudi 2012). El resultado de esta interacción es un efecto de retro-dispersión con mayor potencia, debido a lo cual, un sistema BOTDA resulta menos sensitivo a la acumulación de pérdidas de potencia óptica que un sistema BOTDR. Esta ventaja ha sido utilizada en la MSE, para operar sistemas con los que se pueden cubrir grandes distancias de medición. La monitorización de puentes de grandes luces, o kilómetros de tubería, son algunas de sus principales aplicaciones (Glisic e Inaudi, 2012, Hoepffner, 2008).

En otro sentido, cabe mencionar que la versatilidad de estos sistemas se encuentra limitada por dos aspectos importantes: el uso de los dos extremos de la fibra óptica en la operación de los sistemas BOTDA y su resolución espacial. Por un lado, el acceso a los dos extremos de la fibra es una condicionante importante en el uso de esta técnica. En ocasiones, se puede usar un espejo en uno de los extremos para lograr realizar mediciones. Sin embargo, en un sistema BOTDA el cable de fibra óptica debe completar un bucle o ciclo completo (Hoepffner, 2008).

Al igual que en un sistema BOTDR, la resolución espacial está ligada al periodo de vida de las ondas acústicas o fotones, la cual no es mayor a los 10 ns, y limita la resolución espacial a 1m. Esta resolución espacial es la que generalmente presentan tanto los sistemas BOTDA como los BOTDR. El principal factor que limita dicha resolución, es la intensidad extremadamente baja que presenta la retro-dispersión de Brillouin, lo cual hace extremadamente difícil el aumento de la resolución espacial (Samiec, 2012). En este sentido, si uno de los principales objetivos de la MSE es la detección de daño, los SFOD basados en la retro-dispersión de Brillouin presentan una limitación importante debido al límite de un 1 m de resolución espacial.

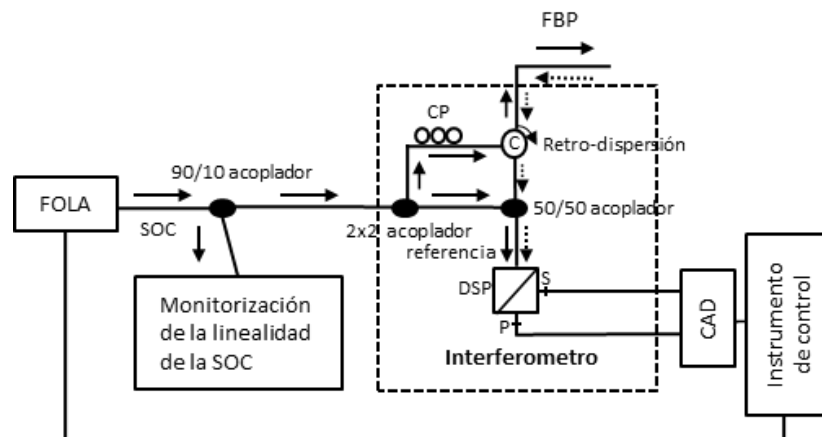
Como respuesta a estas limitaciones, se han propuesto alternativas con el propósito de mejorar la detección de señales de retro-dispersión de baja intensidad e incrementar la resolución espacial. Así, se han desarrollado nuevos sistemas que permiten una resolución espacial del orden de centímetros (Thévanaz, 2010, Bao y Chen, 2012), así como otras alternativas de tratamiento de las señales ópticas, como el análisis de correlación óptica de Brillouin (BOCDA por sus siglas en inglés) (Hotate, *et al.*, 2002, Imai, *et al.*, 2010).

Actualmente, los SFOD basados en la retro-dispersión de Brillouin son aplicados tanto en pruebas de laboratorio como en pruebas campo. Hay ejemplos en la monitorización de grandes puentes, edificios, líneas ferroviarias y tuberías (Ohno, *et al.*, 2001). En todas estas aplicaciones, si dentro de los objetivos de la monitorización, se encuentra la detección de daño, se ha tenido que recurrir al desarrollo de complejos algoritmos (Ravet, *et al.*, 2009), y/o a la aplicación de sofisticados dispositivos (Shen, *et al.*, 2010) para lograr obtener resoluciones milimétricas bajo la retro-dispersión de Brillouin.

2.5.4 Reflectómetro Óptico de Retrodispersión (OBR Optical Backscattered Reflectometer).

Como se muestra en la Fig. 2.4, en términos absolutos, la retro-dispersión de Rayleigh es también de una intensidad muy pequeña, aunque es significativamente mayor que la retro-dispersión de Brillouin (Yu y Yin, 2012). Sin embargo, y a diferencia de la retro-dispersión de Brillouin, la de Rayleigh es un fenómeno lineal y obtener variaciones tanto de temperatura como de deformación con 1 m de resolución espacial y efectos de atenuación no es posible. Se ha desarrollado, un SFOD basado en el análisis de la retro-dispersión de Rayleigh (Froggatt y Moore, 1998a). Básicamente, este sistema se conforma como se muestra en la Fig. 2.9. Primero, se lanza una Señal Óptica Continua (SOC) y ajustable, a través de una Fuente Óptica Láser Ajustable (FOLA). Dicha señal es dividida de manera no uniforme por un acoplador 90/10, y un pequeño porcentaje de la señal laser, alrededor de un 10 %, entra a la red óptica para comprobar su linealidad. El otro 90 % de la

señal, sigue su trayectoria hacia la red de medición del sistema (Lally, *et al.*, 2012). Dentro de esta red de medición, un elemento muy importante es el reflectómetro, el cual dota al sistema de una



alta resolución espacial.

Fig. 2.9 Configuración de un sistema OBR.

Aquí, un acoplador 2x2 divide la señal óptica continua y la envía por partes iguales hacia los dos brazos del sistema. Una parte de la señal va hacia la FBP, y la otra parte de la señal se toma como referencia. Antes de llegar a la fibra óptica bajo prueba, la señal continua pasa por un controlador de polarización (CP) y un circulador (C). Posteriormente, la señal llega a la fibra óptica y se produce el proceso de retro-dispersión. La señal óptica contenida en la retro-dispersión, se recombina con la señal de referencia por medio del circulador y un brazo acoplador 50/50. Aquí, a través de un divisor de señales polarizadas (DSP), la señal de referencia se divide en dos estados de polarización ortogonales (Soller, *et al.*, 2006) y se produce y registra la interferencia entre la señal óptica de la retro-dispersión y estos dos estados de polarización por medio de dos detectores denominados S y P. Las señales de los detectores S y P se digitalizan por medio de un Conversor Analógico-Digital (CAD) y se envían al instrumento de control para su procesamiento. De la suma vectorial de las señales S y P se obtiene una medida consistente de la dispersión de Rayleigh (Lally, *et al.*, 2012).

En el sistema OBR, una señal óptica laser ajustable se utiliza como fuente de luz, por lo que es posible producir una señal periódica en el detector. El detector recibe simultáneamente, todas las señales ópticas de retro-dispersión de cada segmento de la fibra. En este proceso, la frecuencia de cada segmento de la fibra, depende de su localización con respecto a su posición dentro de la fibra (Zhang y Wu, 2008). La totalidad de la señal es dividida, y la frecuencia asociada a cada segmento se obtiene aplicando las técnicas conocidas como reflectometría óptica en el dominio de la

frecuencia (OFDR, por sus siglas en inglés) y el barrido de longitud de onda por interferometría (SWI por sus siglas en inglés) (Gifford, *et al.*, 2007). Con la técnica SWI, la retro-dispersión de la señal óptica continua, puede dividirse en pequeñas ventanas de análisis con anchos del orden de centímetros, cada uno de los cuales, puede considerarse como una ranura de Bragg de tipo aleatorio (Froggatt y Moore, 1998b) y cubrir así, toda la longitud de la fibra óptica bajo prueba, como se muestra en la Fig. 2.10. Posteriormente, las señales de estas ventanas se transforman al dominio de la frecuencia para obtener un patrón de fluctuación de la reflexión en cada una de ellas. La característica más importante de dicho patrón es su estabilidad cuando una fibra óptica se prueba bajo condiciones externas que no alteran su condición. Por lo anterior, dichos valores se toman como un valor de referencia, y se considera una característica propia de cada fibra (Samiec, 2012).

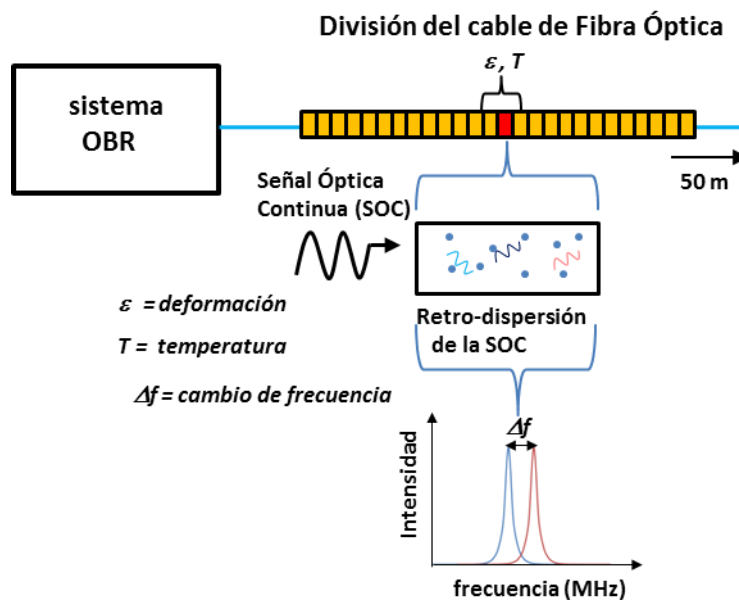


Fig. 2.10 Proceso de medición de la retro-dispersión de Rayleigh.

Cuando una fibra óptica está sujeta a variaciones externas de temperatura y deformación, las frecuencias de referencia cambian proporcionalmente a dichos cambios externos. Gracias a esta proporcionalidad y a la aplicación de la técnica SWI, se pueden medir las variaciones de la temperatura o la deformación en cada una de las pequeñas ventanas en las que se ha dividido la fibra, como se muestra en la Fig. 2.10. Las mediciones pueden tener una resolución espacial del orden de centímetros, y en ocasiones hasta de milímetros.

Sin embargo, los sistemas OBR al proveer una alta resolución espacial, están limitados a medir distancias relativamente cortas en comparación con las que se logran con los SFOD basados en la retro-dispersión de Brillouin. Se reportan distancias máximas del orden de los 100 m (Palmieri y Schenato, 2013).

Los sistemas OBR producen una gran densidad de puntos en pequeñas distancias. Esta característica los hace muy atractivos en aplicaciones en las cuales los sistemas BOTDR y BOTDA presentan limitaciones debido a su baja resolución espacial. Un ejemplo de estas aplicaciones es la detección de fisuras en obras civiles.

2.6 Principales sistemas de monitorización disponibles con SFOD

Desde 2002, cuando el primer sistema de retro-dispersión Brillouin fue implementado, el uso de los sistemas basados en SFOD se ha extendido y al menos se pueden encontrar seis sistemas hoy en el mercado (Delepine-Lesoille, 2008). Posteriormente en la primavera de 2006, el primer sistema basado en la retro-dispersión de Rayleigh con resolución espacial milimétrica y más de 50 m de longitud de medición, se pudo adquirir en forma comercial. Las características de los sistemas que se pueden adquirir en el mercado, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales sistemas con SFOD disponibles comercialmente.

Compañía	Sistema	Técnica de medición	Rango (máx) km	Resolución espacial (m)	Resolución deformación ($\mu\epsilon$)+/-
Yokogawa	AQ8603	BOTDR	24	1	1
Sensornet	DTSS	BOTDR	24	1	20
Neubrex	Neubrescope NBX-6000	BOTDA	20	0.1	N/A
Omnisens*	DiTeSt	BOTDA	30	0.5	2
OZ Optics*	Foresight	BOTDA	40	0.1	0.05
LUNA Tech*~	ODISi/OBR4600	OFTDR	0.05-0.07	0.0005	2

* varios modelos

~ Retro-dispersión de Rayleigh

Cabe mencionar que, también a nivel investigación, diferentes grupos han desarrollado prototipos de sistemas de monitorización con SDOF (Bernini, *et al.*, 2011, Torres, 2012). Estos prototipos han sido probados en pruebas de laboratorio y de campo con resultados aceptables.

Tanto a nivel de prototipo como comercialmente, los SFOD basados en la técnica Brillouin son los de mayor uso y aplicación en el campo de la MSE de obras civiles. En la Tabla 1, se observa

que con los sistemas BOTDR y BODTA, se pueden lograr grandes longitudes de monitorización. Lo anterior resulta sumamente atractivo para su aplicación en la evaluación de estructuras de grandes dimensiones, como puentes de gran luz, túneles y presas.

Debido a que en los sistemas BOTDR solamente se requiere del uso de uno de los extremos de la fibra para llevar a cabo una monitorización, algunos sistemas de ese tipo pueden seguir midiendo incluso en el caso de que alguna sección de la fibra óptica sufra un daño. Lo anterior, no sucede en el caso de los sistemas BOTDA, en los cuales, para su funcionamiento, la fibra óptica debe de completar un bucle cerrado sin ninguna clase de daño.

Con relación a las ventajas que puede ofrecer un sistema BOTDA, se encuentra la evaluación estructural local y la posible detección de daños muy específicos, como la presencia de fisuras. Lo anterior se debe al uso de la retro-dispersión estimulada, que se traduce en la obtención de señales de mayor intensidad, que con el uso de métodos complejos de análisis de señales y algoritmos computacionales han logrado establecer metodologías basadas en la retro-dispersión de Brillouin para la detección de fisuras.

Sin embargo y en términos prácticos, los sistemas basados en la retro-dispersión de Brillouin presentan una limitación importante para este tipo de aplicaciones. En este sentido y de manera relativamente reciente se ha desarrollado una nueva técnica de monitorización con SDOF. Esta técnica se basa en la retro-dispersión de Rayleigh y la aplicación de la OFDR, para lograr un método de monitorización estructural local y global, cuya principal característica es la alta resolución espacial. Con la aplicación de la OFDR, básicamente se obtiene la respuesta en frecuencia de una señal óptica, cuyas frecuencias son barridas en un ancho de banda que se extiende algunos nanómetros. De acuerdo con Palmieri y Schenato, 2013, esta solución permite lograr una extremadamente alta resolución espacial, del orden de milímetros. También, como se mencionó con anterioridad, esta técnica se limita a la monitorización de estructuras de dimensión media, pero, gracias a su alta resolución espacial, la detección, localización y cuantificación de daño puede ser posible, tal y como se demuestra en esta tesis para el caso de estructuras de hormigón.

CAPÍTULO 3

LOS SFOD EN LA MONITORIZACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL. ESTADO DEL ARTE

3. 1 Introducción

El uso de los sistemas de medición con SFOD pretende abrir nuevas posibilidades en el campo de la MSE. Monitorizar el comportamiento de un elemento o de todo un sistema estructural en toda o gran parte de su longitud y sección transversal de forma continua, es la gran ventaja que ofrecen los SFOD frente a los sensores discretos y/o convencionales. Esta característica ha provocado en primera instancia, que un buen número de sistemas de medición con SFOD se hayan desarrollado y probado experimentalmente en laboratorio. Con ello, se han evaluado diferentes procedimientos para su instalación, se ha podido comparar la información que se obtiene de ellos con la que se obtiene por medio de sensores discretos y convencionales, y se ha evaluado en laboratorio su aplicación en diferentes estudios relacionados con el comportamiento estructural (Rodríguez, *et al.*, 2015b).

A partir de los resultados obtenidos en dichas pruebas, los SFOD han comenzado a ser considerados como una alternativa de medición en la ingeniería estructural. Su uso, tanto en pruebas de laboratorio, como en pruebas de campo y en monitorizaciones temporales o permanentes de distintos tipos de obras civiles en servicio, comienza a notarse con mayor frecuencia (Barrias, *et al.*, 2016).

A continuación, se hace un recorrido por el estado del arte del uso de sistemas con SFOD como herramienta de medición en ingeniería civil.

Se parte de su aplicación en pruebas de laboratorio, y posteriormente se describen distintos procesos de MSE en diversas obras de ingeniería civil. Cabe mencionar que esta revisión, se limita solamente a los casos en los que se han utilizado SFOD. Los usos y aplicaciones de los principales SFO discretos que actualmente se utilizan en la monitorización de obras civiles, han sido descritos desde hace algunos años en un gran número de publicaciones y trabajos de investigación (Casas y Cruz, 2003 y Rodríguez, *et al.*, 2015b).

Posteriormente, debido al enfoque que se sigue en este trabajo, se hace énfasis en experiencias derivadas de la aplicación de sistemas con SFOD en el estudio del comportamiento de estructuras

de hormigón. Se describen ensayos de laboratorio, pruebas de campo, así como aplicaciones en la monitorización temporal y permanente de estructuras en servicio. Por último, de forma específica, se discute en torno al uso de los sistemas con SFOD en la detección, localización y cuantificación de fisuras. En este sentido, los sistemas OBR debido a su alta resolución, muestran un gran potencial para poder realizar procesos de monitorización enfocados a la detección de daño en estructuras de hormigón.

Estas aplicaciones, muestran la gran versatilidad de los SFOD, pero también algunas de sus limitaciones. Al ser sensores conformados por materiales ópticos cristalinos, del orden de varios metros de longitud y sólo unos pocos micrómetros de diámetro, su manejo, pegado e instalación requiere de muchos cuidados para su buen funcionamiento (Zhang, *et al.*, 2014). Sin embargo con el uso de los SFOD se han abierto nuevas posibilidades que con trabajos de mejora en el futuro, podrán llevarse a cabo con éxito.

Finalmente, se describen algunos de los aspectos más relevantes sobre el papel que actualmente tiene la MSE dentro de la ingeniería civil, al considerar que su objetivo final debe ser el facilitar el entendimiento del comportamiento de estructuras reales, y aportar información que sea de importancia para la evaluación de la seguridad de una estructura.

3.2 Los sistemas de medición con SFOD en pruebas de laboratorio.

El uso de los SFOD en pruebas experimentales de laboratorio también tiene aspectos de gran interés dentro del campo de la ingeniería estructural. Primeramente, al tratarse de un sistema relativamente nuevo de medición, los SDOF han sido evaluados en laboratorio con el fin de obtener y conocer su respuesta ante diferentes solicitaciones. Los estudios realizados en este sentido, se han centrado en aspectos que son fundamentales para optimizar su aplicación, difundir su uso y avalar los resultados que de ellos se obtienen. Actualmente, existen ya un buen número de estudios relacionados con la transferencia de deformaciones entre distintos tipos de material y un SFOD sobre el cual se coloca. También se pueden encontrar estudios en los que los SFOD se utilizan como base para plantear métodos de detección de daño en estructuras.

Por otro lado, los SFOD pueden ser utilizados como una alternativa de instrumentación en pruebas de laboratorio. Lo anterior con el fin de tener una redundancia en la información, y en el mejor de los casos, el de la obtención de información que al utilizar solamente sensores discretos, no podría ser obtenida. A continuación se hace una descripción de algunas de los estudios de laboratorio más relevantes en los que diferentes tipos de SFOD se han utilizado.

3.2.1 Mecanismos de transferencia de deformaciones entre SFOD y distintos materiales.

Los estudios con relación al fenómeno de la transferencia de deformaciones entre un SFOD y un material determinado han sido estudiados a través de diferentes alternativas. Se han llevado a cabo pruebas mecánicas en laboratorio (Henault, *et al.*, 2012, Billon, *et al.*, 2014), y la adherencia ha sido estudiada numéricamente (Billon, *et al.*, 2014, Wan, *et al.*, 2008) con el fin de validar diferentes metodologías que se han propuesto para cuantificar dicha transferencia de deformaciones. La importancia de estos estudios radica en la influencia que puede tener la cubierta de protección que normalmente tiene la fibra óptica. Cuando dicha cubierta es significativa, los resultados medidos a través de un SFOD pueden diferir de los que realmente presenta la estructura (Li y Wang, 2003, Her y Wang, 2011).

Sin embargo, existen casos (Casas, *et al.*, 2014, Villalba y Casas, 2013, Rodríguez, *et al.*, 2014), en los cuales esta transferencia de deformaciones puede no considerarse, debido a que el SFOD utilizado es una fibra óptica con un protección muy simple y sin ningún tipo de cubierta espacial. En la Fig. 3.1, se hace un comparativo de dos tipos de SFOD que son utilizados en la monitorización de obras civiles.

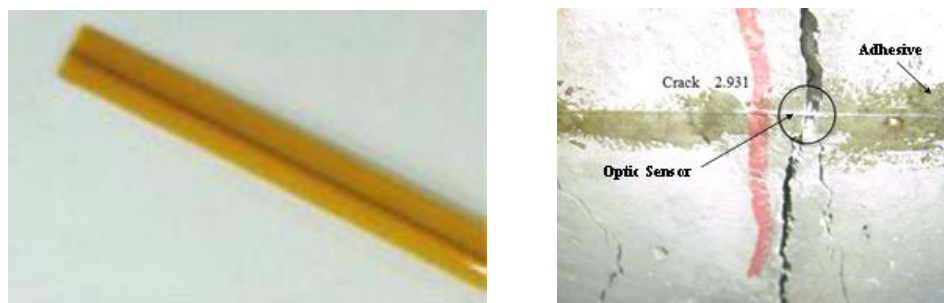


Fig. 3.1 SFOD con y sin cubierta espacial de protección.

En la Fig. 3.1, resalta la diferencia y por lo tanto la influencia que puede tener la cubierta en la transferencia de deformaciones entre el sensor y la estructura. En términos prácticos, la deformación obtenida a través del SFOD en el segundo caso y la que se presenta en la estructura monitorizada se puede considerar la misma. Sin embargo, en la monitorización de una estructura en servicio y de larga duración, dicho sensor puede presentar fuertes limitaciones respecto a su comportamiento, si se coloca de manera expuesta a las variaciones ambientales, o es sujeto de importantes variaciones de carga.

Otro aspecto importante en la aplicación de los SFOD en la MSE, son los procesos de instalación y adherencia de este tipo de sensores en los elementos estructurales. En este sentido, se ha estudiado la influencia del tipo de adhesivo para sujetar los SFOD en distintos tipos de superficies. En general, tanto en campo como en laboratorio, el procedimiento de adherencia consiste en limpiar con alcohol la superficie, y utilizar adhesivos epóxicos o cianoacrilatos, para adherir el SFOD a la estructura en estudio, pero evitando el uso excesivo de adhesivo (Rodríguez, *et al.*, 2015, Regier y Hoult, 2014).

Algunos autores como Hoult, *et al.*, 2014 y Regier, 2013, han comprobado en estudios comparativos y en condiciones de laboratorio, que los adhesivos de cianoacrilato tienen un mejor comportamiento sobre superficies metálicas que los adhesivos tipo epoxi. Sin embargo, el uso de adhesivos epoxi en superficies de hormigón, produce mejores resultados que el uso de cianoacrilatos.

3.2.2 Monitorización de cables post-tensados con SFOD

Uno de los aspectos más críticos con relación al buen funcionamiento de las estructuras pretensadas, es el cálculo de las pérdidas de tensión en los cables de pretensado. Así, los sistemas con SFOD basados en la retro-dispersión de Brillouin, comienzan a ser aplicados como una alternativa en la monitorización de este fenómeno. Sistemas con SFOD basados en la técnica BOTDR se han utilizado en la medición de las tensiones de cables postensados. En este sentido, los SFOD han sido adheridos a los cables post-tensados posteriormente a la colocación de los cables en vigas de hormigón. Una vez colocados, a través de los SFOD se ha podido medir la variación de las tensiones en los cables a lo largo del tiempo (Gao, *et al.*, 2006). Actualmente, hay trabajos experimentales en los que sistemas de monitorización basados en la técnica BOTDA, miden la variación de tensiones en los cables de pretensado, desde su fabricación, colocación y puesta en servicio.

Un ejemplo de estos casos, se muestra en la Fig. 3.2. Lo anterior ha sido posible, debido a que se han desarrollado técnicas para embeber los SFOD en los propios cables, durante el proceso de fabricación de los mismos. Las pruebas de laboratorio realizadas hasta el momento, muestran resultados aceptables (Zhou, *et al.*, 2012, Lan, *et al.*, 2014).



Fig. 3.2 Proceso de fabricación de un cable de pretensado con un SFOD embebido (Lan, et al., 2014)

3.3 Monitorización de obras civiles en servicio con SFOD

Las primeras aplicaciones de sistemas de monitorización con SFOD están asociadas con su capacidad para medir de manera continua grandes longitudes. Así, aunado a su inmunidad a las interferencias y su resistencia a los ambientes adversos, los sistemas OTDR han sido aplicados principalmente en el control de daños de estructuras geotécnicas de grandes dimensiones como presas y terraplenes. En estas aplicaciones, la resolución espacial de los sistemas OTDR es suficiente para predecir posibles deslizamientos (Kreeber, *et al.*, 2010). También, los sistemas con SFOD basados en las técnicas BOTDR y BOTDA han sido utilizados en estructuras importantes en servicio. Taludes (Shi, *et al.*, 2006), presas (Thévenaz, *et al.*, 1999, Inaudi y Glisic, 2005), túneles (Torres, 2012, Li, *et al.*, 2010), pilas (Iten, 2011) y tuberías (Inaudi y Glisic, 2005, Rajeev, *et al.*, 2013), son ejemplos de la diversidad de estructuras monitorizadas a través de esta clase de sistemas que actualmente existen comercialmente.

Por otro lado, cabe señalar el caso específico de la referencia de Torres, 2012. En esta referencia, se describe el desarrollo de tres prototipos diferentes de sensores ópticos: un de tipo sensor discreto, otro sensor de longitud larga, y un SFOD de tipo BOTDA. Posteriormente, se evalúa el comportamiento de cada uno, al ser utilizados en forma simultánea en la monitorización de la variación de temperatura y deformación de la sección transversal de un túnel durante su construcción. De acuerdo a los resultados obtenidos, el prototipo de SFOD reproduce de manera adecuada el patrón de comportamiento del túnel en estudio.

El objetivo principal de las aplicaciones mencionadas hasta ahora ha sido el de realizar una evaluación global de las estructuras y la posible detección de una falla o deslizamiento. Sin embargo, la localización con exactitud y la correspondiente cuantificación del daño estructural es difícil de obtener dada la baja resolución espacial de estos sistemas.

Otro tipo de estructuras, como edificios históricos de mampostería (Bastianini, *et al.*, 2005a), o una gran chimenea de enfriamiento (Casas, *et al.*, 2014), has sido monitorizadas a través de sistemas con SFOD. En el primer caso, un sistema AQ8603 basado en la técnica BODTR (Tabla 1), se utilizó para obtener la información de un SFOD embebido en una malla de polímero reforzada y adherida a con resina epoxi a una de las paredes de mampostería del edificio. Gracias a esta manera de abordar el problema, se pudo obtener la distribución de las deformaciones promedio, incluso a niveles muy bajos de deformación.

En el segundo caso, la técnica OFDR aplicada a través de un sistema ODiSI (Tabla 1), se utilizó para monitorizar el comportamiento de una chimenea de hormigón de 120 m de altura. Esta estructura fue instrumentada con el objetivo de obtener el patrón de fisuración producido por el efecto de las fuerzas de viento y las variaciones de la temperatura. La monitorización se realizó antes y después de la reparación de fisuras importantes que presentaba la estructura y fue posible gracias a la alta resolución espacial que se puede obtener a través de este sistema.

De esta descripción de aplicaciones es importante resaltar, tanto las grandes dimensiones de las estructuras monitorizadas, como su diversidad en cuanto a geometrías y materiales estructurales. Algunos ejemplos de estas estructuras, se muestran en las Fig. 3.3 a 3.5.



Fig. 3.3 Vista de la presa monitorizada con un sistema BOTDA (Inaudi y Glisic, 2005)

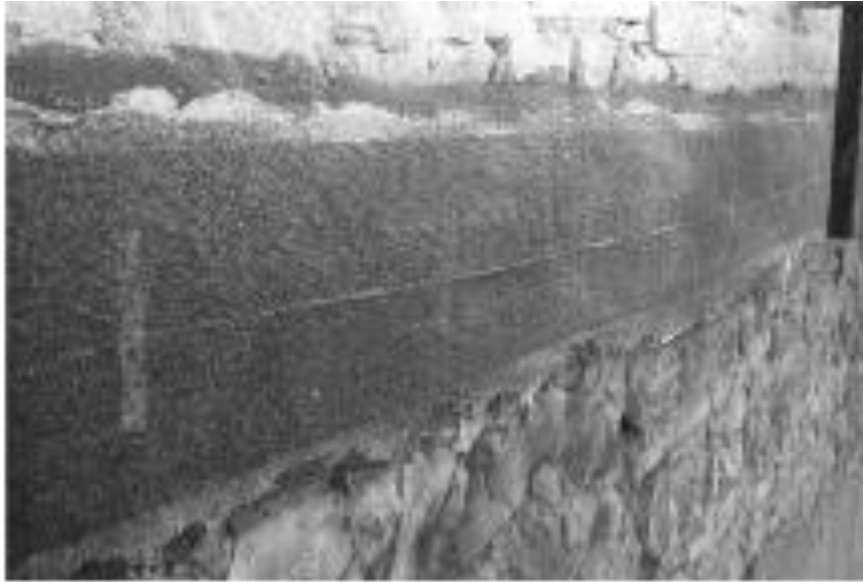


Fig. 3.4 Vista de SFOD en la pared de mampostería de un edificio histórico (Bastianini, et al., 2005a)

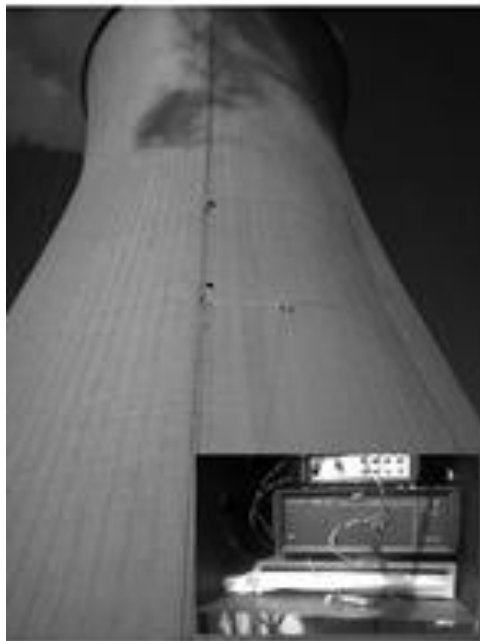


Fig. 3.5 Chimenea de hormigón monitorizada con un sistema ODiSI (Casas, et al., 2014)

3.4 Monitorización de procesos constructivos con SFOD

Los sistemas con SFOD resultan muy atractivos no sólo en la monitorización de puentes en servicio sino también en el seguimiento de procesos constructivos complejos. Un ejemplo de este

último caso fue la monitorización del proceso constructivo del puente en arco Wu Gorge, con una luz de 462 m y 200 m de altura. En la construcción de este puente se implementaron nuevas técnicas de supervisión y monitorización. Una vista del puente Wu Gorge, se aprecia en la Fig. 3.6.



Fig. 3.6 Vista del puente Wu Gorge (Tianguo, et al., 2011)

La monitorización consistió, en la detección de posibles desprendimientos locales o la aparición de fisuras, entre el hormigón interior y la estructura metálica y de sección tubular que conforma la estructura principal del puente. En la Fig. 3.7, se observa la sección tubular del puente, y también el SFOD que se utilizó durante la monitorización y que fue instalada antes de rellenar con hormigón el interior de la sección.



Fig. 3.7 Sección tubular del puente Wu Gorge y ubicación del SFOD (Tianguo, et al., 2011)

En la monitorización que se realizó entre los años 2001 a 2003, no se utilizó un sistema específicamente diseñado para su uso en obras de ingeniería civil. El sistema de captura de datos consistió en el uso de un sistema OTDR que a través de la dispersión Rayleigh y conceptos relacionados con la microflexión de fibra óptica, permitió medir las pérdidas en las señales ópticas y asociarlas a pérdidas de contacto y a la presencia de fisuras. Esta información fue corroborada con la que se obtuvo en forma simultánea, a través inspección ultrasónica.

3.5 Monitorización de pruebas de carga en puentes con SFOD

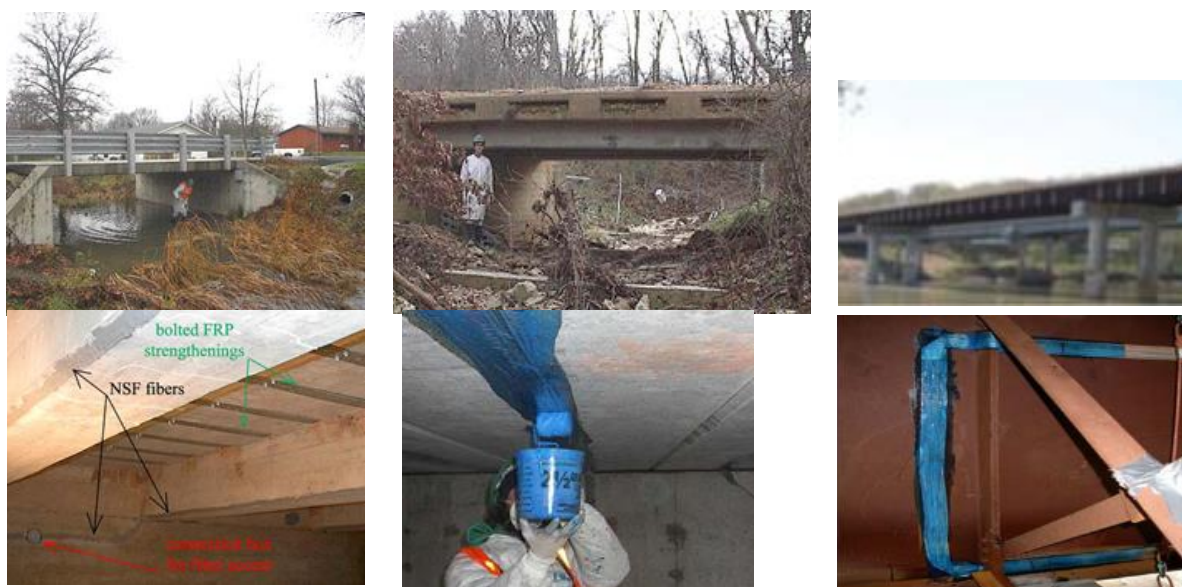
Entre los años 2005 y 2014, se reportaron varios ejemplos de monitorización de pruebas de campo en puentes en los cuales se utilizaron sistemas con SFOD. Básicamente todos los puentes en estudio estuvieron sujetos a una serie de cargas estáticas producidas por camiones conforme a un programa de pruebas previamente establecido. Posteriormente y en la mayoría de estos estudios, los resultados obtenidos experimentalmente con los sistemas con SDOF, se compararon con los datos obtenidos con otros instrumentos de medición, e incluso en algunas ocasiones, con modelos de tipo numérico o analítico, así como con códigos de diseño. En estos trabajos, también se puede encontrar comentarios referentes a la instalación de la fibra óptica como sensor en una estructura real.

En el año 2005, dos puentes de pequeñas dimensiones fueron monitorizados con un sistema comercial AQ8603 basado en la técnica BOTDR. Las características estructurales de ambos puentes y de las pruebas de carga se describen detalladamente en Bastiniani, *et al.*, 2005b. Posteriormente, el mismo grupo de investigación realizó otro programa de pruebas de carga, pero esta ocasión, en un puente de mayores dimensiones, y en el que se aplicó el mismo sistema con SFOD que se utilizó en los dos puentes anteriores (Bastiniani, *et al.*, 2005c). Los tres puentes monitorizados se muestran en la Fig. 3.8.

Para llevar a cabo la monitorización del puente Phelps Country construido en 1900, se utilizó un SFOD que consistió en un cable de fibra óptica embebido en las vigas del puente. Para los otros dos puentes estudiados se utilizó una fibra FRP especial. También en la Fig. 3.8, se aprecian aspectos de la instalación de los SFOD en estos tres puentes.

En 2010, se llevó a cabo a una prueba de carga en un puente de hormigón recién construido (Villalba, *et al.*, 2012, Casas, *et al.*, 2014). Uno de los objetivos de estas pruebas, fue el probar la efectividad del sistema ODiSI en este tipo de pruebas. Se monitorizaron las deformaciones producidas por el paso de un camión, en algunas de las vigas de hormigón pretensado que conforman uno de los vanos del puente, y en los pequeños voladizos de hormigón armado que

son parte de la superestructura del mismo. Esta aplicación fue importante porque un sistema con SFOD y alta resolución espacial, fue usado por primera vez en una prueba de carga en un puente de uso reciente. La Fig. 3.9 muestra algunos aspectos del puente en estudio.



Phelps Country bridge

Walters Street bridge

Bridge A6358

Fig. 3.8 Puentes monitorizados con un sistema AQ8603 (Bastianini, et al., 2005b y 2005c)



Fig. 3.9 Viaducto monitorizado con un sistema ODiSI (Villalba y Casas, 2012)

Estudios de campo similares se realizaron 2012 (Minardo, *et al.*, 2012a). En este caso, la monitorización se realizó en un puente de estructura mixta hormigón-acero, cuyo aspecto se muestra en la Fig. 3.10. Aquí, el sistema con SFOD que se utilizó no fue un sistema comercial, sino un prototipo portátil desarrollado basado en la técnica BOTDA.



Fig. 3.10 Puente de estructura mixta monitorizado con un sistema prototipo portátil BOTDA (Minardo, et al., 2012a)

Recientemente en 2014, se realizó la monitorización de las pruebas de carga realizadas en un puente construido en 1933 en Canadá a través de un sistema OBR4600 con SDOF basado en la retro-dispersión de Rayleigh (Regier y Hoult, 2014). En la Fig. 3.11 se muestran dos representaciones esquemáticas de este puente.

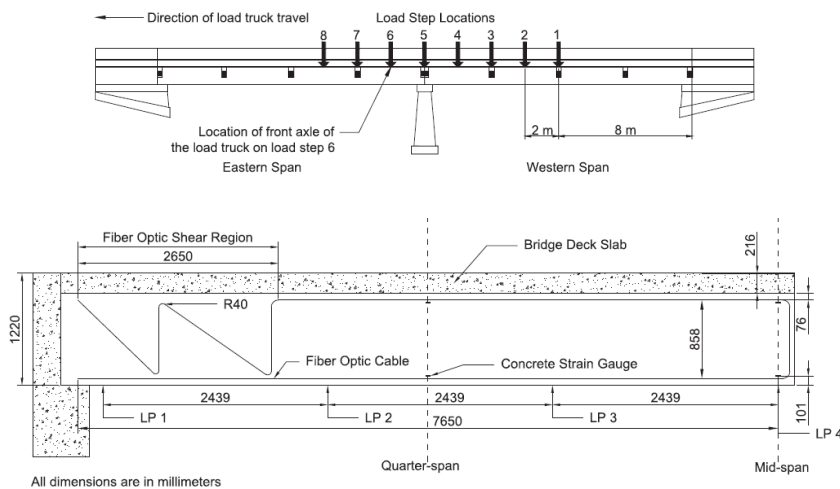


Fig. 3.11 Puente monitorizado con un sistema OBR4600 (Regier y Hoult, 2014)

En general, los resultados obtenidos en todas las aplicaciones descritas con distintos sistemas con SFOD son aceptables. La información obtenida con los SFOD fue comparada en todos los casos, con datos obtenidos a través de otro tipo de sensores como galgas, transductores de desplazamiento LVDT, flexómetros, y en otras ocasiones también con modelos numéricos basados en el método de los elementos finitos.

En algunos de los puentes monitorizados, como fue el caso de los estudiados en las referencias de Bastiniani, *et al.*, 2005a, y Regier y Hout, 2014, durante el paso de los camiones en ciertas pruebas, se observó la aparición de fisuras. En este sentido, los sistemas basados en la técnica BOTDR indicaron que no hubo cambios, lo cual es el reflejo de la limitación de estos sistemas debido a su resolución espacial (Bastiniani, *et al.*, 2005a). Por otro lado, en el estudio en el cual se utilizó un sistema OBR, la detección de fisuras fue posible.

También estas aplicaciones resultan de interés porque muestran diferentes formas de colocar SFOD. En uno de los puentes, la fibra óptica se embebió en las vigas (Bastiniani, *et al.*, 2005a), en otros dos casos, se utilizaron fibras fabricadas especialmente y que fueron adheridas con diferentes tipos de adhesivos, en vigas de hormigón (Bastiniani, *et al.*, 2005a, Bastiniani, *et al.*, 2005b).

3.6 Monitorización temporal y a largo plazo de puentes con SFOD

Resulta interesante comentar los aspectos más relevantes de la aplicación de estos sistemas en la monitorización temporal o a largo plazo de estructuras en servicio. Un primer ejemplo, es la aplicación del mismo sistema prototipo descrito en Minardo, *et al.*, 2012a, en la monitorización permanente durante un año de un puente de hormigón de 70 m vano (Minardo, *et al.*, 2012b).

En términos estructurales y por su forma en arco, este puente fue diseñado para trabajar en compresión. Una vista del puente en estudio, se muestra en la Fig. 3.12.



Fig. 3.12 Vista general del puente Musmeci (Minardo, et al., 2012b).

En esta monitorización se utilizaron en forma paralela dos cables de 13 m de longitud con una cubierta de silicón, como SDOF pero que fueron adheridos a la superficie de hormigón del puente

con dos tipos diferentes de adhesivos. En uno de ellos se utilizó un adhesivo epoxi, y en el otro cable, un adhesivo de poliuretano.

A lo largo de toda la campaña experimental, se apreciaron variaciones en la temperatura de alrededor de 30° C. Las mediciones de las deformaciones en el puente se obtuvieron bajo su operación normal. En términos generales, los resultados obtenidos con el SFOD adherido con epoxi fueron los de mayor consistencia, mientras que las dos últimas lecturas de deformaciones en el SFOD adherido con poliuretano no fue posible realizarlas. Ello se debió a la rotura de este SFOD durante la penúltima lectura de la monitorización. Las lecturas efectuadas con los SDOF revelan la presencia de una fisura alrededor de los 10.5 m de la posición de la fibra. Esta fisura se puede observar en la Fig. 3.13.



Fig. 3.13 Vista de la apertura de fisuras a una distancia de 10.5 m de la fibra óptica (Minardo, et al., 2012b).

Dicha fisura ya existía cuando la fibra óptica fue instalada, y tenía un ancho del orden de 1 mm. La fisura fue detectada visualmente, pero su ancho no pudo ser cuantificado por el sistema. En los registros de deformación obtenidos, la región de la fisura aparece con una longitud del orden de 1 m, lo cual corresponde a la resolución espacial del prototipo BOTDA que fue utilizado. Lo anterior se aprecia en la Fig. 3.14, y puede considerarse como una limitación a nivel cuantitativo de este sistema en la obtención de un patrón de daños de la estructura.

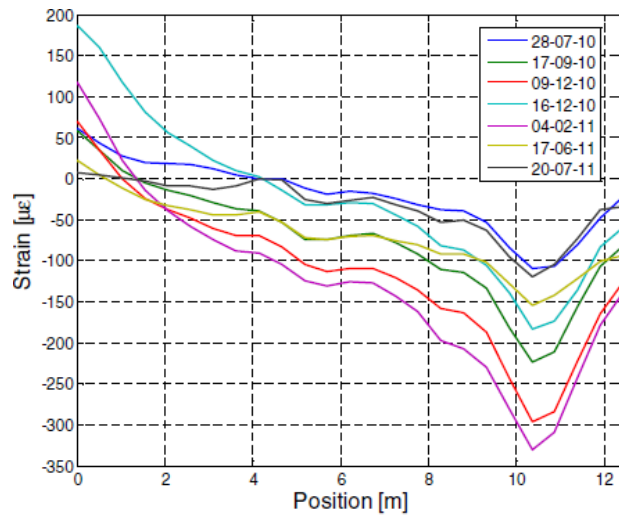


Fig. 3.14 Distribución de deformaciones por compresión en el puente Musmeci (Minardo, et al., 2012b).

Un ejemplo interesante de la validación de una diversidad de sensores de fibra óptica en estructuras en servicio es el puente Streicker (Glisic, et al., 2011, Glisic, et al., 2013). Este es un puente peatonal de hormigón que se encuentra dentro del campus de la Universidad de Princeton. En esta estructura, se han aplicado dos técnicas de monitorización estructural para estudiar su comportamiento durante cuatro años y desde el inicio de su construcción. La geometría del puente se muestra en la Fig. 3.15.



Fig. 3.15 Vista del puente Striecker y algunos aspectos de su instrumentación (Glisic, et al., 2011, Glisic, et al., 2013).

La primera técnica utilizada en la monitorización de este puente está basada en el uso de sensores discretos de rejillas de Bragg y sensores discretos de gran longitud (600 mm). Con la integración de la información de esta red de sensores discretos, se ha podido evaluar en forma global el comportamiento de la estructura. De manera complementaria se ha utilizado un sistema con SFOD

y usando la técnica BOTDA para monitorizar la integridad del puente, y tener la posibilidad de detectar daños, como lo son la aparición de fisuras.

En este proyecto, y como se puede observar también en la Fig. 3.15, algunos de los sensores discretos fueron embebidos durante la construcción del puente. Por lo anterior con la información obtenida, se han podido realizar observaciones importantes desde el inicio de la operación del puente. El comportamiento del hormigón a edad temprana, así como su fisuración ha sido detectada (Glisic, *et al.*, 2013). El objetivo de este proyecto de monitorización a largo plazo, es desarrollar un marco que permita considerar a la MSE basada en el uso de SFO como una herramienta viable en la toma de decisiones enfocadas al mantenimiento de puentes (Glisic *et al.* 2013).

Entre los proyectos de MSE de estructuras de grandes dimensiones, basados en el uso de sistemas con SFOD, la monitorización del puente Götaälv en Suecia, es uno de los más completos (Enckell, *et al.*, 2011). Una vista del puente se muestra en la Fig. 3.16. En la monitorización de este puente metálico construido en 1939, y que tiene una longitud total de 950 m, se ha utilizado un sistema DiTeSt basado en la técnica BOTDA, la cual se ha descrito en el capítulo 2 de este trabajo. En la aplicación de esta técnica la máxima resolución espacial que se obtiene es de 1 m, la cual, de acuerdo a los objetivos del estudio, resulta suficiente para realizar una monitorización global de los cambios estructurales más significativos que pueda presentar el puente. Posteriormente, para hacer el actual sistema de monitorización más completo, se realizaron trabajos con el objetivo de establecer un método de detección temprana de fisuras en superficies metálicas. Los resultados más relevantes en este sentido se han publicado en Shen, *et al.*, 2010, Mufti, *et al.*, 2011 y Glisic e Inaudi, 2011. La MSE de este puente está planificada para tener una duración de 15 años.



Fig. 3.16 Vista del puente Götaälv (Enckell, et al., 2011).

3.7 Aplicación de los sistemas de medición con SFOD en estructuras de hormigón

3.7.1 Detección de fisuras en elementos de hormigón.

Cuando una estructura de hormigón es monitorizada, uno de los principales retos de un sistema de MSE es la detección oportuna de fisuras. Para fines de seguridad, durabilidad y estética, las fisuras requieren de ser detectadas en su estado inicial de desarrollo. Sin embargo, en el caso de las estructuras de hormigón, la distribución de estas fisuras, tiene un carácter sumamente aleatorio y su detección con sensores discretos resulta muy difícil. En este sentido y desde hace varios años se han llevado a cabo algunas investigaciones relacionadas con la implementación de SFOD para detectar fisuras (Voss y Wasner, 1994, Zou y Feng, 2008).

Entre las primeras propuestas, se encuentra el desarrollo de sistemas con SFOD basados en el registro de las pérdidas de intensidad en la retro-dispersión de Rayleigh a través de un sistema OTDR (Leung, *et al.*, 2000, Olson, *et al.*, 2005, Wan y Leung, 2007, Liu, *et al.*, 2011). En estas propuestas, el SFOD requiere ser adherido a la superficie estudiada con ciertos cambios de dirección e inclinación. Lo anterior, con el propósito de lograr efectos de micro-flexión en la fibra óptica, cuando ésta es cruzada por una fisura cuya dirección debe ser prácticamente perpendicular al eje transversal del elemento estructural en estudio.

Así, se establecieron correlaciones entre pérdidas de intensidad de la señal óptica, ángulo de inclinación de la fibra, y el número de fisuras registradas, para obtener el ancho de las fisuras y evaluar el daño estructural (Leung, *et al.*, 2005, Bao, *et al.*, 2010). Sin embargo, su aplicación práctica se ve limitada, debido a la complejidad del procedimiento para poder llegar a obtener el ancho de fisura.

En el caso de los SFOD basados en la retro-dispersión de Brillouin, y como se ha mencionado anteriormente, tanto las técnicas BOTDR y BOTDA ofrecen una resolución espacial de 1 m y una precisión en deformación, también limitada. Sin embargo, debido a su gran potencial para cubrir grandes longitudes, son los sistemas con SFOD que han sido más estudiados, desarrollados y aplicados. Por lo anterior, ha habido un buen número de metodologías basadas en la información que se obtiene de estos sistemas, para poder medir fisuras en elementos estructurales de hormigón (Klar, *et al.*, 2010, Shen, *et al.*, 2010, Feng, *et al.*, 2013). Todos estos métodos han sido estudiados y probados a nivel de laboratorio con resultados aceptables, pero en su mayoría continúan bajo supervisión y mejora. En algunos sistemas prototipo como en los sistemas con SFOD basados en

la técnica BOCDA se han logrado resoluciones espaciales de 30 cm (Imai, *et al.*, 2010, Imai y Susuki, 2011, Imai y Feng, 2012).

Actualmente, en la evaluación de fisuras en estructuras de hormigón, se han planteado alternativas diferentes a las basadas en las técnicas de retro-dispersión de Brillouin, con el propósito de obtener metodologías que resulten más prácticas. En este sentido, con información continua obtenida con el mismo sistema utilizado en las referencias Casas, *et al.*, 2015 y Villalba, *et al.*, 2012, se propone en esta tesis doctoral un método simplificado para detección, localización y obtención del ancho promedio de fisuras, en estructuras de hormigón sujetas básicamente a flexión (Rodríguez, *et al.*, 2014 y Rodríguez, *et al.*, 2015a). El método propuesto será descrito en detalle en el capítulo 4. Se basa en la información experimental obtenida en una prueba de laboratorio, de una losa de hormigón armado, instrumentada con un SFOD y sensores convencionales (Villalba 2010, Villalba *et al.* 2011, Villalba *et al.* 2013).

Actualmente, con relación a la detección experimental de fisuras en estructuras de hormigón, existen otras propuestas. Se pueden mencionar la técnica *smart film* (Zhang, *et al.*, 2006, Zhang, *et al.*, 2013, Zhou, 2011), o el procesamiento de imágenes (Caminero, *et al.*, 2013, Rouchier, *et al.*, 2013). La primera técnica, requiere de la fabricación especial de la malla denominada *smart film*, y de un cuidadoso proceso de instalación. En el segundo caso, la versatilidad del sistema es limitada. Comparativamente, los sistemas con SFOD son una herramienta con buen potencial para la monitorización de fisuras en estructuras de hormigón. En forma general, y aunque se requiere de ciertos cuidados, la instalación de los SFOD resulta sencilla y los sistemas de adquisición de datos actuales tienden a ser cada vez más compactos y manejables.

3.8 Conclusiones

En este capítulo se ha hecho una revisión enfocada a las principales aplicaciones de los SFOD en el campo de la ingeniería civil. Se ha mostrado su viabilidad técnica para ser aplicados tanto en pruebas de laboratorio, como en la monitorización de estructuras reales y en servicio. La posibilidad que dan estos sistemas, en cuanto a la obtención de registros continuos de deformación, es la gran ventaja que ofrece su aplicación, respecto al uso de sistemas de monitorización basados solamente en el uso de sensores discretos.

Actualmente, y en función de los objetivos de un proyecto de MSE, existen diferentes tipos de sistemas con SDOF que pueden ser utilizados. Estructuras de grandes dimensiones pueden ser cubiertas y monitorizadas de manera global, con el uso de sistemas basados en técnicas BOTDA.

También, a través del uso de técnicas de análisis de señales y complejos algoritmos, a través de estos sistemas se comienza a lograr establecer metodologías para poder detectar daños.

Recientemente, como se ha descrito anteriormente en este capítulo, para cubrir las limitaciones de resolución espacial de las técnicas basadas en la retro-dispersión de Brillouin, han surgido sistemas basados en la retro-dispersión de Rayleigh. Los sistemas con SFOD denominados ODiSI y OBR que utilizan la técnica OFDR son una alternativa, para detectar, localizar y cuantificar el daño estructural con una alta resolución espacial.

Sin embargo, los sistemas de monitorización con SFOD son una alternativa reciente. Su viabilidad de uso, y su confiabilidad y precisión en estructuras reales en servicio se encuentra todavía un proceso que continua en pruebas. Por esta razón, y con el objetivo de tener un mejor entendimiento de su comportamiento, se requiere de su uso en más pruebas de laboratorio y de experiencias de su aplicación en estructuras reales.

Con lo anterior, se tendrá una mejor comprensión de la transferencia de deformaciones entre un SFOD y distintos materiales estructurales. También se podrán ir mejorando los métodos de detección de fisuras en estructuras de hormigón sujetas a flexión, y extendiendo su aplicación a estructuras sujetas también a efectos de fuerzas cortantes.

También es conveniente mencionar, que actualmente el costo de cualquier sistema comercial con SFOD es elevado, pero en general como ventajas prácticas se puede mencionar que es de fácil instalación y operación al compararlos con un sistema tradicional de MSE. Por esta razón, los sistemas de monitorización con SFOD pueden ser utilizados un gran número de veces, incluso en proyectos de monitorización simultaneas, y amortizar rápidamente la inversión inicial del equipo.

Comparadas con otras tecnologías, las aplicaciones de los sistemas con SFOD son muy recientes. Sin embargo, cuando el uso de esta tecnología se optimice, seguramente su demanda crecerá y con ello los costos iniciales serán más bajos que los actuales (Hoult, *et al.*, 2014).

Con el fin de enmarcar el potencial de la MSE, algunos autores (Sigurdardottir y Glisic, 2014) han establecido cuatro niveles de sofisticación, con los cuales se puede evaluar las características esenciales de un sistema de monitorización.

Nivel I: Es la capacidad de un sistema de MSE para detectar comportamientos estructurales inusuales (por ejemplo daño).

Nivel II: Capacidad de un sistema de MSE para localizar comportamientos estructurales inusuales (certeza de la posición del daño)

Nivel III: Capacidad del sistema de MSE para cuantificar la severidad del daño estructural

Nivel IV: Capacidad del sistema de MSE para transformar los datos obtenidos en información útil para estimar las condiciones actuales de la estructura.

La monitorización mediante SFOD se encuentra en condiciones de cumplir con estos cuatro niveles, tal como se muestra en los siguientes capítulos, donde se han elaborado algoritmos y métodos que permiten un avance significativo en los niveles II a IV. En particular, en lo que hace referencia a la cuantificación del daño (obtención del ancho de fisura) en estructuras de hormigón (nivel III).

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN DEL SISTEMA OBR EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A FLEXIÓN

4.1 Introducción

A partir de este capítulo se presentan las distintas aplicaciones del sistema de medición OBR llevadas a cabo para la realización de esta investigación doctoral. Con ello, se busca mostrar la utilidad y versatilidad de este sistema en estudios específicos relacionados con el comportamiento de estructuras de hormigón, por comparación con las otras tecnologías descritas en el capítulo 2.

En este capítulo, se aborda el caso de un elemento de hormigón armado sometido a flexión e instrumentado con sensores discretos tradicionales como galgas extensométricas, transductores diferenciales de variación lineal (LVDT por sus siglas en inglés) y transductores magnéticos de desplazamiento. La respuesta del elemento a nivel de deformaciones, también fue obtenida con un SFOD adherido a su superficie y conectado a un sistema OBR. Este caso de estudio fue parte de una investigación doctoral previa (Villalba, 2010), en la cual los resultados experimentales obtenidos a través del sistema OBR, mostraron el potencial de este sistema de monitorización, en la detección y localización de fisuras en elementos de hormigón. En el actual trabajo y con el fin de dar continuidad a la experiencia adquirida en el uso de este tipo de sistemas de medición, se recurrió a la información experimental obtenida en aquella ocasión, para proponer un método de cálculo del ancho de fisura promedio en estructuras de hormigón sometidas principalmente a flexión y monitorizada mediante un sistema OBR y un SFOD (Rodríguez, *et al.*, 2014 y Rodríguez, *et al.*, 2015a).

4.2 Metodologías experimentales en elementos de hormigón sujetos a flexión

Generalmente, en los ensayos de laboratorio de elementos de hormigón sometidos a flexión, la instrumentación tradicional de tipo discreto presenta algunas limitaciones en cuanto a la detección y localización de fisuras.

La principal limitación que se tiene al utilizar esta clase de sensores, es que al no poder conocer *a priori* la posición de las fisuras, la localización de las mismas no es posible. Por lo anterior, es común que durante los ensayos de laboratorio, se consideren distintos intervalos de tiempo con carga constante, con el fin de localizar visualmente las fisuras y también poder medir su ancho.

Cuando una fisura se localiza, se marca su inicio y, conforme el ensayo avanza, se prosigue con el trazo de su recorrido. Generalmente, lo anterior se lleva a cabo hasta que el elemento estructural llega a la rotura.

Debido a que el uso de galgas tiene una gran limitación en cuanto a la localización de fisuras, una alternativa de medición es a través del uso de sensores con los cuales se obtienen los desplazamientos en la superficie de hormigón. Así, LVDT, potenciómetros o transductores de tipo magnético resultan ser de utilidad si son colocados en zonas en las cuales se prevé aparezcan fisuras.

La limitación que se presenta en estos casos, es que la detección, localización y medición del ancho de fisura, quedan determinadas por la longitud del sensor, y en muchas ocasiones, la detección de fisuras a lo largo de todo el elemento en estudio no resulta posible.

4.3 La problemática de la fisuración en las estructuras de hormigón

El hormigón es el material estructural más ampliamente utilizado en la construcción por lo que el mantenimiento de la seguridad, funcionalidad y durabilidad de la gran diversidad de obras civiles de este material que existen a nivel mundial es una de las grandes problemáticas que en términos de conservación de infraestructura enfrenta la ingeniería estructural.

En las estructuras de hormigón, la aparición y crecimiento de fisuras en su superficie, es el principal indicio de alguna clase de daño. Lo anterior, se debe básicamente a la baja resistencia de este material a la tracción. Cuando en una estructura de hormigón, su resistencia máxima a la tracción es excedida, aparecen fisuras que a partir de un ancho determinado, pueden generar una gran diversidad de problemáticas estructurales. Es por lo anterior, que a lo largo de muchos años, se han dedicado una gran variedad de estudios al entendimiento y control de la fisuración en el hormigón.

Ejemplos de lo anterior, se pueden extender desde daños en la apariencia de la estructura, debidos a la aparición de fisuras de anchos pequeños, hasta aquellos anchos de fisura que pueden generar la posibilidad de que el agua con agentes agresivos penetre más fácilmente en la estructura y pueda causar la corrosión del acero de refuerzo, lo cual afectará el comportamiento de dicha estructura en términos de su seguridad y durabilidad (Witchukreangkrai, *et al.*, 2004). En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestran ejemplos de lo anterior.

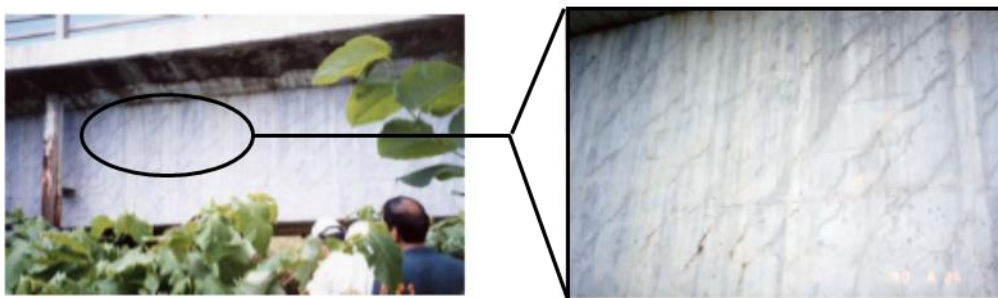


Fig. 4.1 Fisuración por cortante en una viga de un puente de hormigón (De Silva 2008)



*Fig. 4.2 Corrosión de la armadura de un elemento de hormigón (Imagen tomada del sitio:
<https://rbconspro.wordpress.com/tag/corrosion-acero-de-refuerzo/>)*

Por otro lado, y si bien se pueden presentar patrones de fisuración que en términos de seguridad y durabilidad no afecten a la estructura, por razones estéticas ligadas a la funcionalidad, se deben establecer anchos de fisura que no provoquen el deterioro de la estructura ni alarma social. Una vez fisurada, la superficie de hormigón se caracteriza por una discontinuidad visible y medible. Para controlar la forma y el ancho de apertura de una fisura, el refuerzo con barras de acero es el recurso más común. De aquí se establece el control de fisuración que consiste básicamente, en mantener el ancho de la apertura de las fisuras dentro de límites aceptables, con el uso de refuerzo transversal y longitudinal.

4.3.1 Fisuración de elementos de hormigón sujetos a tracción

La fisuración en el hormigón se produce por diferentes causas, por lo que se pueden distinguir distintos tipos de fisuras. Dentro de estas fisuras, el caso más simple es el de tracción pura, en el

cual, un elemento de hormigón está sujeto a una fuerza axial de tracción. En este caso las fisuras se producen casi en forma paralela a lo largo de toda una sección, por lo que las fisuras que se producen en este caso, están separadas por una distancia Sr , y son de un ancho w constante, como se observa en la Fig. 4.3.

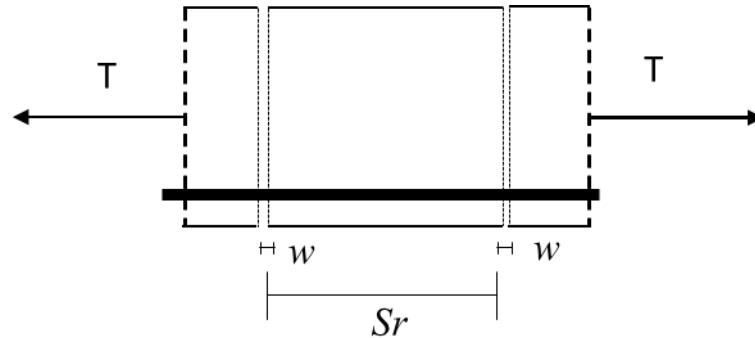


Fig. 4.3 Fisuración por tracción en un elemento de hormigón.

4.3.2 Fisuración de elementos de hormigón sujetos a flexión

Las fisuras por flexión, generalmente se inician en la cara a tracción del elemento, y se prolongan hasta alcanzar el eje neutro de la sección, como se puede observar en la Fig. 4.4. En relación a la apariencia de las fisuras a flexión, aunque se puede considerar que se desarrollan casi en forma paralela, resultados de pruebas experimentales foto-ópticas, han demostrado que los anchos de fisura antes y después de la armadura, son mayores, debido a las tensiones de adherencia entre los el acero y el hormigón, las cuales reducen las deformaciones en el hormigón. Lo anterior también se muestra en la Fig. 4.4. Sin embargo y para fines prácticos, los anchos de fisura w generalmente son estudiados en la superficie de hormigón, ya que este es el sitio donde las fisuras se observan y se pueden medir sus anchos de manera más fácil.

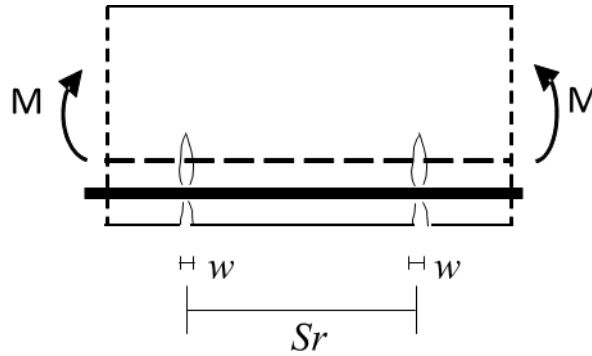


Fig. 4.4 Fisuración por flexión en un elemento de hormigón.

4.3.3 Definición del ancho de fisura por flexión

Cuando en un elemento de hormigón armado sujeto a flexión aparece una fisura, la compatibilidad de deformaciones entre el acero y el hormigón no se mantiene, y se produce una diferencia de deformaciones. Posteriormente, esta diferencia se acumula y se traduce en un desplazamiento relativo entre ambos materiales. El ancho de fisura que se produce a nivel del acero es resultado de la suma de los dos deslizamientos que se producen en ambos lados del refuerzo.

Una formulación rigurosa de ancho de fisura, debe estar basada en la integración de la diferencia de las deformaciones entre el acero (ϵ_s) y el hormigón (ϵ_c) a nivel de la armadura, en un espacio determinado por la separación de fisuras, y que se denomina S_r . Al considerar la integración de las dos deformaciones anteriores, se puede establecer la ecuación 4.1, con la que se obtienen los dos valores de deslizamiento que se producen tanto en el acero, como en el hormigón, y los cuales denominan como s_1 y s_2 .

$$w = \int_0^{S_r} (\epsilon_s(x) - \epsilon_c(x)) dx = s_1 + s_2 \quad (4.1)$$

La ecuación 4.1 indica que el ancho de fisura se calcula en la armadura, por lo que los resultados deben ser comparados con mediciones que se realicen al mismo nivel. Pero nuevamente, y como se indicó anteriormente, al considerar sólo la superficie de hormigón, la ecuación 4.1 se puede reducir a la ecuación 4.2, en la cual el ancho de fisura w , se expresa solamente en función de la

deformación del hormigón entre las fisuras a nivel de la superficie (ϵ_c), y la longitud denominada S_r .

$$w = \int_0^{S_r} \epsilon_c(x) dx \quad (4.2)$$

4.4 Método OBR para el cálculo del ancho de fisura promedio en elementos de hormigón sujetos a flexión

El método para el cálculo del ancho de fisura promedio en elementos de hormigón sujetos a flexión se basa en la información experimental que se obtiene del sistema OBR. La principal característica de esta información, y su gran potencial, es que una fibra adherida a la superficie de hormigón ofrece la distribución de las deformaciones unitarias a lo largo de dicha superficie con una alta resolución espacial. Con lo anterior, se puede llegar a establecer una formulación con la cual obtener el ancho de fisura promedio en una zona determinada del elemento estructural.

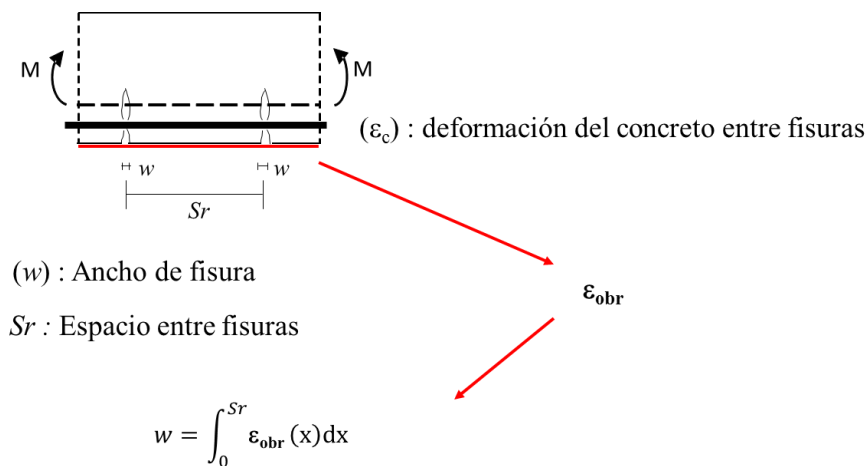


Fig. 4.5 Descripción del cálculo del ancho de fisura promedio con el método OBR.

Como se muestra en la Fig. 4.5, el cálculo del ancho de fisura (w) se basa en la integración de las deformaciones registradas experimentalmente (ϵ_{OBR}) en forma similar a la ecuación 4.2.

Con el fin de obtener una deformación unitaria promedio (ϵ_{prom}), como se muestra en la Fig. 4.6, se definen una distribución de deformaciones unitarias (ϵ_{OBR}) a partir de la deformación unitaria correspondiente a la resistencia a tracción del hormigón (ϵ_{fct}), y que es el valor que da inicio a la

fisuración del hormigón. En la Fig. 4.6, cada uno de los picos corresponde a una zona con una fisura.

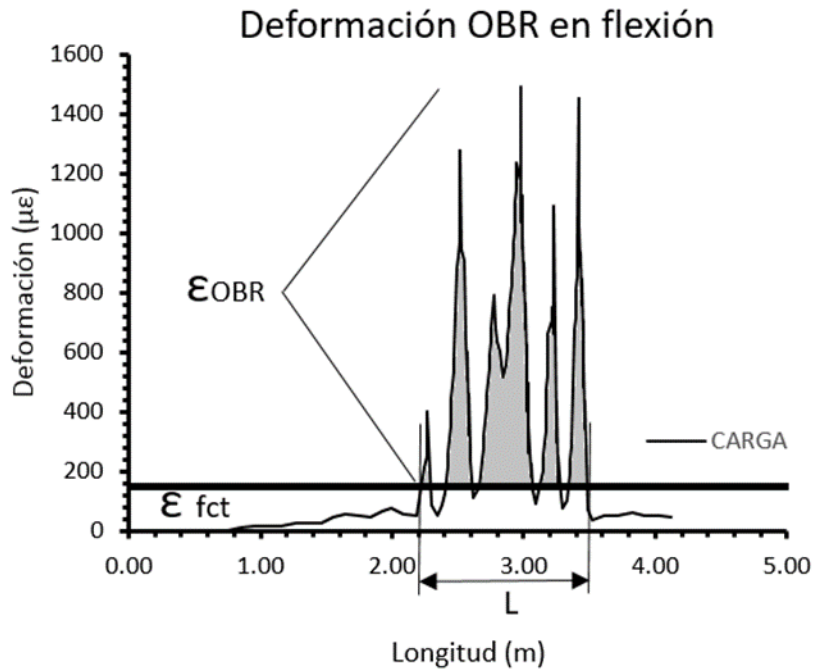


Fig. 4.6. Definición de la longitud de integración para el cálculo del ancho de fisura.

Bajo este criterio, la deformación unitaria promedio (ϵ_{prom}), corresponde al área bajo la curva de la deformación unitaria total sobre una longitud característica de fisuración denominada L , la cual también se muestra en la Fig 4.6. L corresponde a la longitud del elemento donde $\epsilon_{OBR} > \epsilon_{fct}$. De esta forma se establece la ecuación 4.3.

$$\epsilon_{prom} = \frac{1}{L} \int_0^L \epsilon_{OBR} dL \quad (4.3)$$

Esta deformación unitaria promedio (ϵ_{prom}) tiene dos componentes: la deformación unitaria que se presenta en el hormigón sin fisuración (ϵ_{fct}), y la deformación unitaria producida por la presencia de fisuras dentro de un área fisurada. Con la definición de los dos componentes anteriores se establece la ecuación 4.4:

$$\epsilon_{prom} = \epsilon_{fct} + \frac{\sum w}{L} \quad (4.4)$$

En la ecuación 4.4, Σw comprende la suma de los anchos de todas las fisuras w que se presentan dentro de la zona fisurada de longitud L .

De esta forma, se define un ancho de fisura promedio que se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$w_{prom} = \frac{\Sigma w}{N} \quad (4.5)$$

En la ecuación 4.5, N es el número de fisuras y se obtiene al contar los picos que se presentan en los perfiles de deformación continuos de los resultados experimentales OBR (Ver Fig. 4.6 donde $N = 6$).

El método OBR, puede ser aplicado para diferentes niveles de carga con el objeto de conocer la variación de los anchos de fisura en función del incremento de la carga.

4.5 Aplicación del método OBR a una losa de hormigón sometida a flexión

En esta primera aplicación y como se mencionó anteriormente, se utilizó la información obtenida en el trabajo doctoral de Villalba, 2010, para profundizar en el uso de la información que se obtiene de un sistema de medición OBR. El ensayo que se llevó a cabo en aquella ocasión ha sido descrito ampliamente en publicaciones anteriores (Villalba y Casas, 2009, Villalba y Casas, 2013, Villalba y Casas, 2016). Por esta razón, aquí se resumen los aspectos más importantes del mismo y que tienen relación directa con la información experimental utilizada en la presente tesis.

4.5.1 Resumen del ensayo

El ensayo consistió en la instrumentación de una losa de hormigón armado simplemente apoyada en sus dos extremos, con un vano de 5.6 m, 1.6 m de ancho y 0.285 m de espesor. La losa de hormigón armado estuvo sujeta a una carga aplicada por un actuador con capacidad de 1 MN, en el centro del vano. Una vista general de este ensayo, se muestra en la Fig. 4.7.

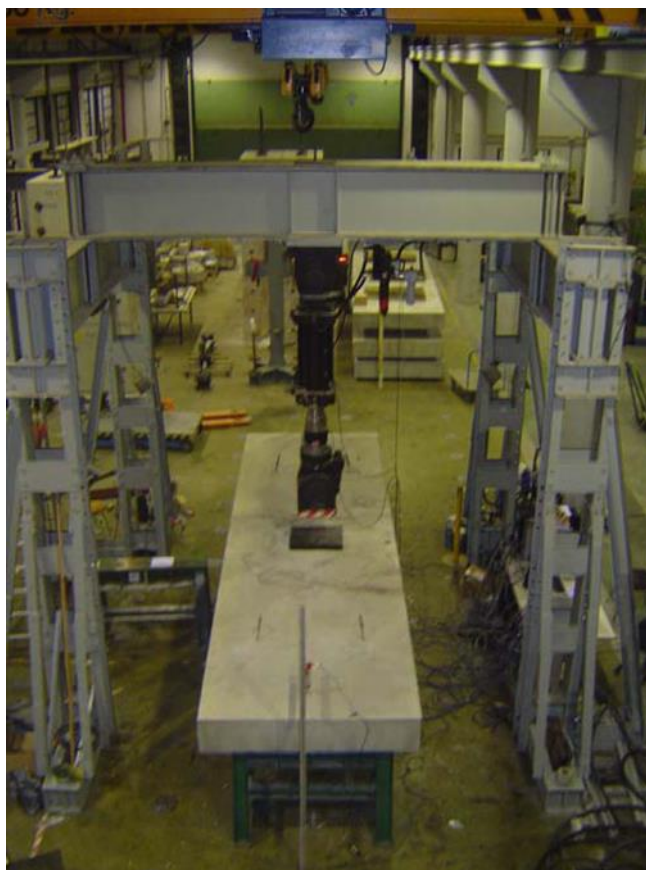


Fig. 4.7 Vista general del ensayo (Villalba, 2010).

4.5.2 Descripción de la instrumentación convencional

La losa de hormigón armado fue instrumentada en forma convencional por medio de galgas extensométricas en las barras longitudinales con el objeto de obtener el nivel de deformaciones en la armadura. Para obtener las deflexiones producidas durante el ensayo, se colocaron LVDT, en sus extremos y en la parte central. También, en el centro de la losa y en su parte inferior, se colocaron transductores magnéticos de desplazamiento, con el fin de medir el proceso de apertura de fisuras durante el ensayo. La ubicación y el número de sensores que conformaron la instrumentación tradicional se muestra en la Fig. 4.8.

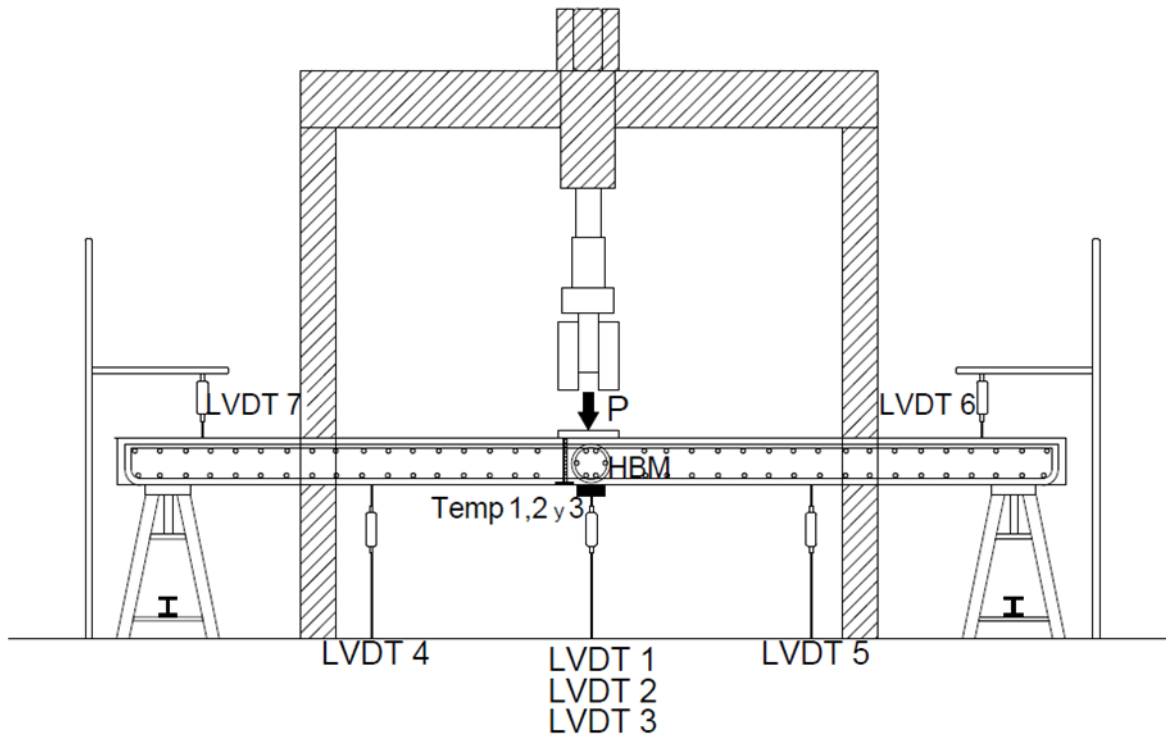


Fig. 4.8. Ubicación de los sensores discretos (Villalba, 2010).

4.5.3 Descripción de la instrumentación con SFOD

La losa fue monitorizada con un SFOD colocado, tanto en la parte superior como en la parte inferior de la losa, dividido en cuatro secciones como se muestra en la Figura 4.8. La fibra óptica utilizada fue de tipo mono-modo, con 50 m de longitud. Esta fibra óptica tiene un recubrimiento que protege a la fibra de posibles rasgaduras o ataques ambientales. Este recubrimiento es de poliamida y se caracteriza por su prácticamente nula influencia entre la fibra y la superficie adherida. Lo anterior, es un factor que adquiere importancia durante el proceso de transferencia de deformaciones.

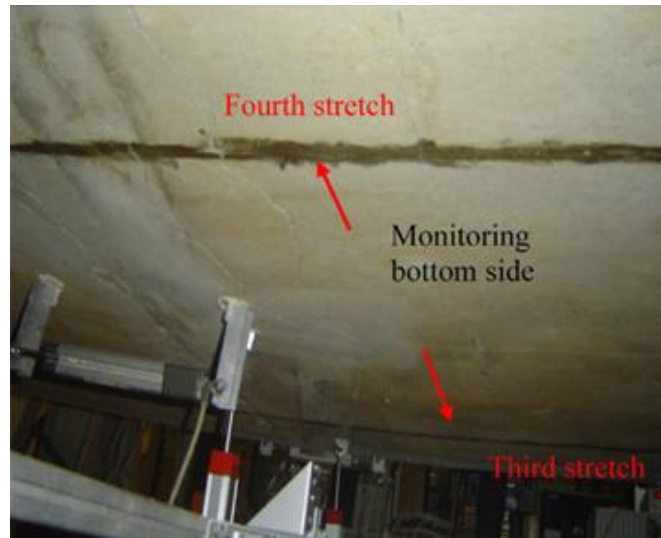
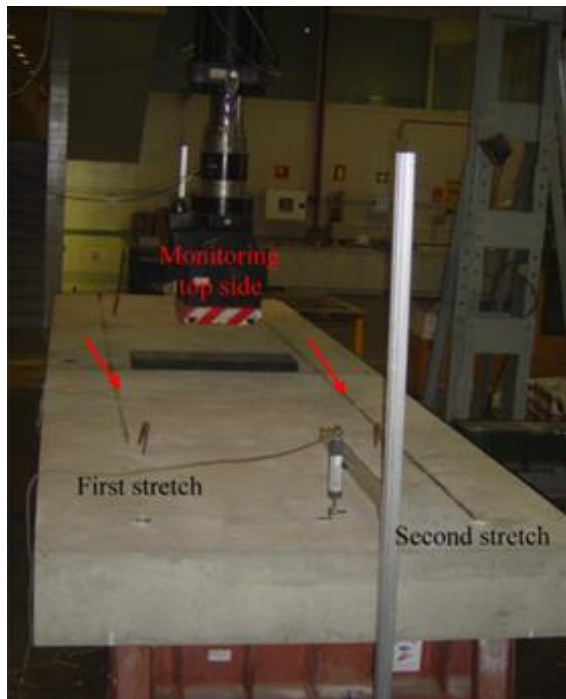


Fig. 4.8 Ubicación del SFOD en la losa de hormigón (Villalba, 2010).

4.5.4 Resultados experimentales con ambos tipos de instrumentación

Este ensayo es un ejemplo de la aplicación de dos tipos de instrumentación, con fines complementarios. A través de la instrumentación convencional, y de manera específica con las galgas, se pudo tener información relativa a los niveles de deformación en el refuerzo longitudinal (Villalba, 2010). La forma en la cual la losa fue deformándose con el aumento de carga se obtuvo con el uso de LVDT, y el posterior cálculo de las flechas correspondientes (Villalba, 2010). Respecto al cálculo del ancho de fisura, se pudieron obtener los anchos promedio, pero de manera restringida al centro del vano de la losa, debido al carácter discreto de los transductores magnéticos utilizados durante el ensayo (Villalba, 2010).

El sistema OBR puede ser usado para medir con una resolución espacial de 0.05 a 10 cm y una sensibilidad de $\pm 2 \mu\epsilon$, en función de la exactitud y precisión que se quiera obtener en el cálculo de las deformaciones. Sin embargo, en el sistema existe una relación entre la exactitud en la medición de la deformación y la resolución espacial. A mayor resolución espacial menor exactitud en la medición. Por lo anterior, la decisión en cual resolución espacial utilizar el sistema OBR depende tanto del nivel de precisión requerida, como de la variación que se espera obtener de las deformaciones (Regier y Hoult, 2014). Durante el ensayo realizado se ha utilizado una resolución

espacial de 1 cm. Lo anterior, con el fin de obtener registros de deformación con un nivel de precisión adecuado tanto para registrar fisuras como variaciones de deformación importantes.

En este sentido y gracias a la gran resolución espacial del sistema OBR, un número considerable de picos pudo ser captado en los registros de deformación obtenidos a distintos niveles de carga.

Estos picos corresponden a la detección de fisuras, incluso a bajos niveles de carga. Un ejemplo de estos registros se muestra en la Fig. 4.9, en la que se representa la deformación en la parte inferior de la losa a un nivel de carga de 50 kN. Este nivel de carga, puede considerarse bajo aunque ligeramente superior a la resistencia a flexo-tracción del hormigón. Sin embargo, en la figura se pueden apreciar un buen número de picos que están asociados a la presencia de fisuras, que debido al nivel de carga, todavía no pudieron ser apreciados visualmente con facilidad (anchos a partir de 0.07 mm). Lo anterior, es una muestra del potencial que tiene este sistema en la detección prematura de fisuras. Los resultados de este caso de estudio, en el que la flexión es el principal factor en el comportamiento mecánico del elemento, muestran un buen comportamiento a niveles de carga mayores al mostrado en la Fig. 4.9

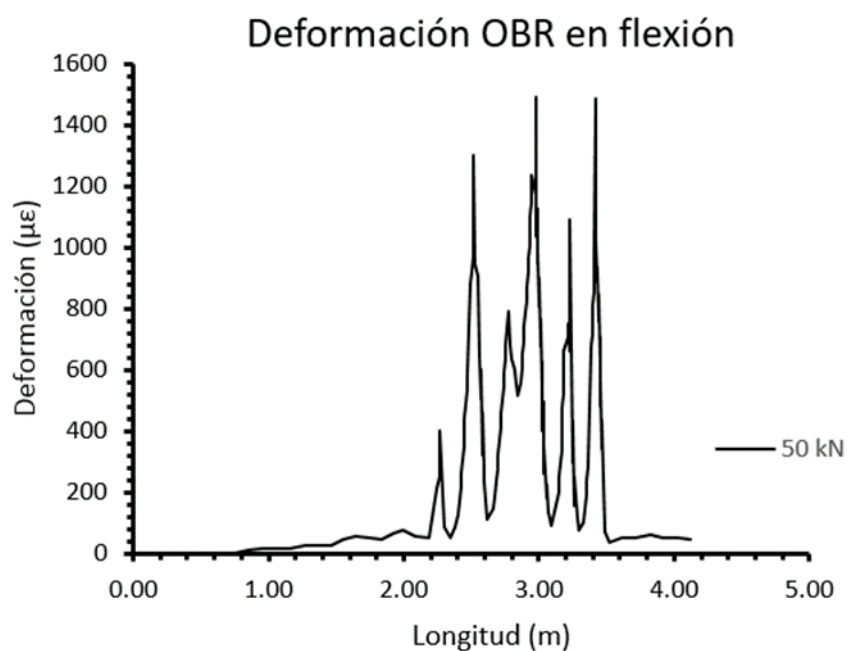


Fig. 4.9 Registro continuo de deformaciones obtenido con el sistema OBR.

Durante el ensayo, se obtuvo de manera continua la distribución de las deformaciones a lo largo de toda la fibra adherida a la losa de hormigón a medida que aumentaba el nivel de carga aplicado. Para la interpretación y análisis de la información, la fibra se dividió en cuatro secciones. Las dos

primeras se ubicaron en la parte superior para medir las deformaciones a compresión, y la tercera y cuarta para conocer las deformaciones a tracción en la parte inferior de la losa.

Algunos de los resultados experimentales en la tercera y cuarta sección en la parte inferior de la losa y a diferentes niveles de carga (de 50 kN a 110 kN con incrementos de 20 kN) se muestran en las Figs. 4.10 y 4.11. En estas figuras se observan picos que corresponden a la presencia de fisuras. Los primeros picos aparecen a un nivel de carga de 50 kN en el centro del vano, lo cual corresponde con la carga de fisuración calculada en forma analítica (Villalba, 2010). En general, la localización de los picos se corresponde con la localización de fisuras que se aprecian en forma visual (mayores de 0.1 mm).

Con los datos obtenidos a través del SFOD y los otros resultados experimentales provenientes de las galgas, los LVDT y los transductores magnéticos de desplazamiento, se aplicó el método propuesto en la sección 4.4, para obtener el ancho de fisura promedio en la losa en estudio.

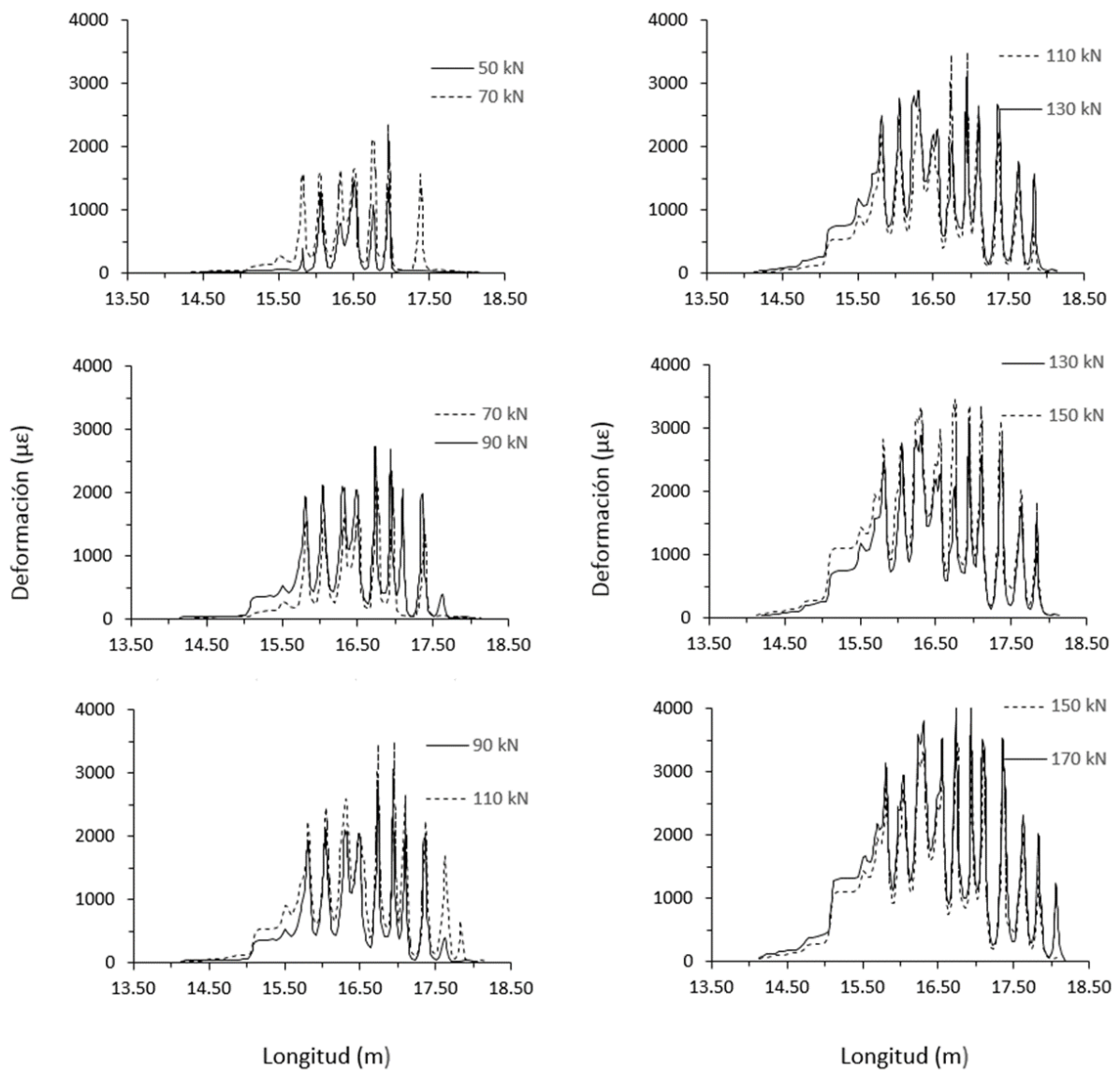


Fig. 4.10 Deformaciones en la parte baja de la losa a lo largo del tercer tramo del SFOD.

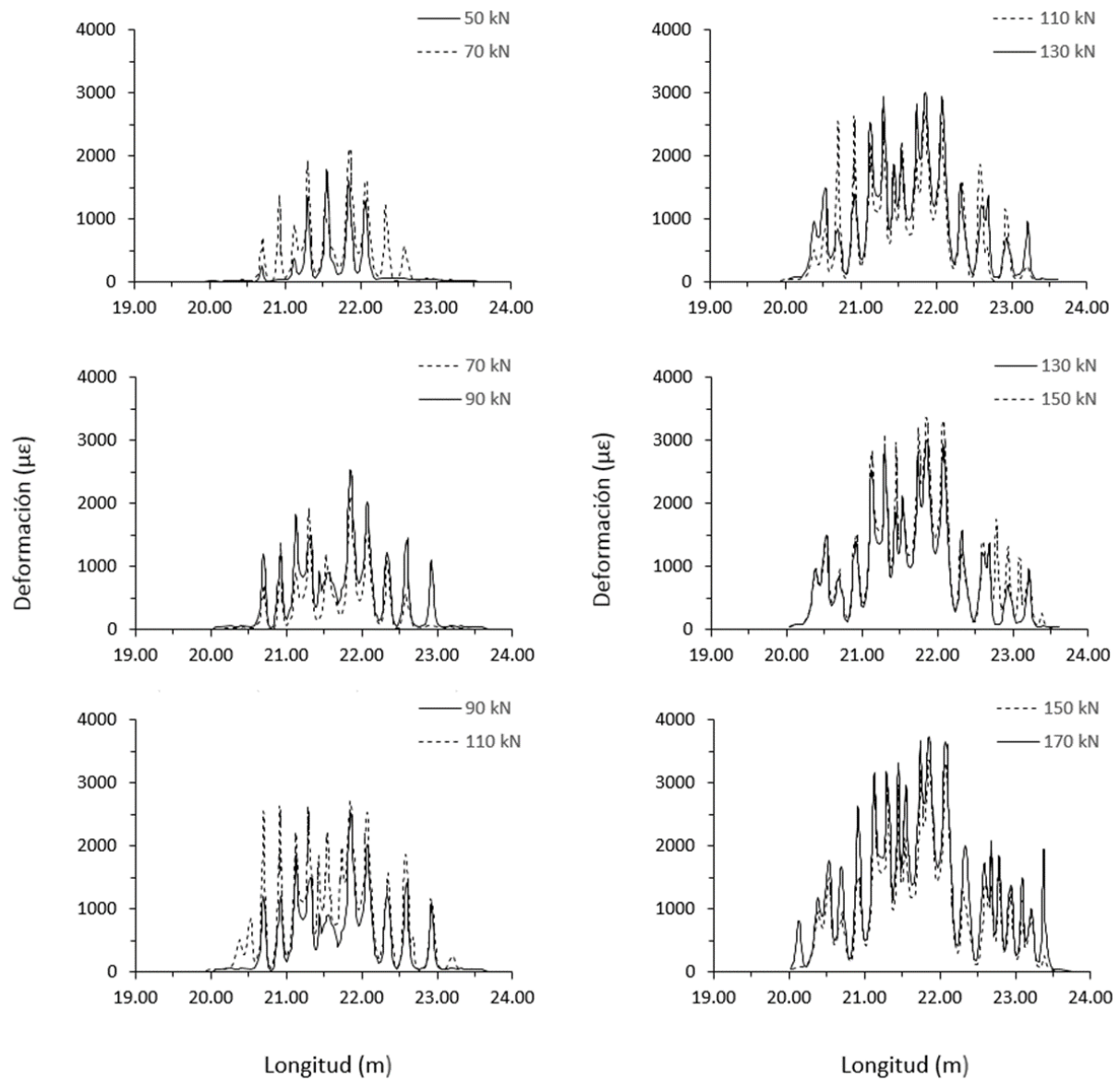


Fig. 4.11 Deformaciones en la parte baja de la losa a lo largo del cuarto tramo del SFOD.

4.5.4.1 Anchos de fisura promedio con la instrumentación convencional

Como se mencionó anteriormente, para la obtención de los anchos de fisura con la instrumentación convencional, se colocaron dos transductores magnéticos. La ubicación de estos transductores se muestra en la Fig. 4.12. En esta figura se observan un transductor 1 al frente y a la mitad del vano, y otro transductor 2, abajo y cercano al centro geométrico de la losa.



Fig. 4.12. Transductores magnéticos de desplazamiento para la obtención del ancho de fisura (Villalba, 2010)

En las dos primeras columnas de la Tabla 4.1, se muestran los valores de apertura obtenidos con los dos transductores, y a diferentes niveles de carga. En la tercera columna, se presenta una media aritmética de la apertura obtenida para los niveles de carga mostrados. Ambos transductores estaban situadas en la misma sección transversal de la losa.

Tabla 4.1 Anchos de fisura con transductores discretos

Carga (kN)	t1 (mm)	t2 (mm)	Media aritmética (mm)
50	0.058	0.099	0.079
70	0.077	0.154	0.116
90	0.105	0.125	0.115
111	0.166	0.147	0.157
130	0.296	0.200	0.248
150	0.370	0.267	0.319
170	0.439	0.337	0.388

4.5.4.2 Anchos de fisura promedio con la aplicación del Método OBR

Para cada uno de los niveles de carga que se muestran en la Tabla 4.1, también se obtuvieron los anchos de fisura promedio a través del método OBR, propuesto en la sección 4.4. El método OBR está basado en la obtención del área bajo la curva que se genera bajo una condición de carga determinada. En este sentido, la resolución espacial con la que se realiza la obtención continua de la deformación, es un factor que influye en el nivel de aproximación que se tenga en la obtención de esta área. Por ello y por recomendación en la aplicación del sistema OBR, aunque se pueden obtener lecturas con resoluciones milimétricas, la resolución espacial se limita a 1 cm. Lo anterior debido a tener una relación señal/ruido lo suficientemente grande, y poder obtener lecturas de la deformación, con una buena exactitud y, por lo tanto, máxima fiabilidad.

Al pretender obtener de manera correcta los anchos de fisura que se presentan en una estructura de hormigón, y que son de orden sub milimétrico, la resolución espacial de 1 cm, se presenta como una limitación. Sin embargo, en la detección y localización de las mismas, el sistema OBR muestra ser una herramienta única. Para cubrir la limitación de la resolución espacial en la cuantificación del ancho de fisuras, se recurrió a un proceso de digitalización de las gráficas correspondientes a diferentes niveles de carga. Con este proceso intermedio se obtuvieron de manera aproximada las gráficas correspondientes a cada nivel de carga estudiado, pero con una resolución milimétrica producida por la digitalización.

Así, por medio de la aplicación de una integración trapezoidal simple, se obtuvieron las áreas bajo la curva de cada nivel de carga, que se muestran en las Tabla 4.2 y 4.3

Tabla. 4.2 Anchos de fisura promedio para la sección 3 del SFOD colocado en la parte inferior de la losa.

Sección 3								
Carga (kN)	ϵ_{obr} ($\mu\epsilon$ x mm)	L_{fis} (mm)	ϵ_{obr}/L_{fis} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{fct} ($\mu\epsilon$)	$(\epsilon_{obr}/L_{fis})-\epsilon_{fct}$ ($\mu\epsilon$)	$(A/L-fct)*L$ (mm)	número de fisuras	$w_{prom\ Secc3}$ (mm)
50	513623.53	1204.1	426.56	120	306.56	369131.53	6	0.062
70	1260749.75	2190.8	575.47	120	455.47	997853.75	9	0.111
90	1950065.72	2609.5	747.29	120	627.29	1636925.72	11	0.149
110	2877518.67	2943	977.75	120	857.75	2524358.67	13	0.194
130	3465778.81	3167.9	1094.03	120	974.03	3085630.81	13	0.237
150	4280989.21	3376.9	1267.73	120	1147.73	3875761.21	13	0.298
170	5063006.29	3790.1	1335.85	120	1215.85	4608194.29	13	0.354

Tabla. 4.3 Anchos de fisura promedio para la sección 4 del SFOD colocado en la parte inferior de la losa.

Sección 4								
Carga (kN)	ϵ_{obr} ($\mu\epsilon \times mm$)	L_{fis} (mm)	ϵ_{obr}/L_{fis} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{fct} ($\mu\epsilon$)	$(\epsilon_{obr}/L_{fis})-\epsilon_{fct}$ ($\mu\epsilon$)	$(A/L-fct)*L$ (mm)	número de fisuras	$w_{prom\ Secc4}$ (mm)
50	567056.49	1486.6	381.45	120	261.45	388664.49	6	0.065
70	1103296.75	2021.4	545.81	120	425.81	860728.75	9	0.096
90	1683889.51	2386.7	705.53	120	585.53	1397485.51	11	0.127
110	2389971.93	2245.4	1064.39	120	944.39	2120523.93	13	0.163
130	3069758.51	2972.1	1032.86	120	912.86	2713106.51	13	0.209
150	3586898.11	3197.8	1121.68	120	1001.68	3203162.11	13	0.246
170	4462344.2	3981	1120.91	120	1000.91	3984624.20	13	0.307

En la tabla 4.4, se resumen los anchos de fisura promedio obtenidos en las secciones 3 y 4 de la parte inferior de la losa. En la última columna de esta misma tabla, se muestran los promedios de ancho de fisura obtenidos de las mediciones de ambos extremos de la parte inferior de la losa.

Los anchos de fisura obtenidos en las dos secciones del SFOD de la parte inferior de la losa son de magnitudes muy similares, lo que sirve para comprobar la eficiencia del método OBR, para determinar anchos de fisura promedio en estructuras de hormigón.

Tabla. 4.4 Anchos de fisura promedio entre las secciones 3 y 4 del SFOD colocado en la parte baja de la losa.

Carga (kN)	$w_{prom\ Secc3}$ (mm)	$w_{prom\ Secc4}$ (mm)	w_{prom} (mm)
50	0.062	0.065	0.063
70	0.111	0.096	0.103
90	0.149	0.127	0.138
110	0.194	0.163	0.179
130	0.237	0.209	0.223
150	0.298	0.246	0.272
170	0.354	0.307	0.330

4.5.4.3 Comparación de los anchos de fisura promedio obtenidos

En la Tabla 4.5, se comparan los anchos de fisura promedio de la parte inferior de la losa, obtenidos con el método OBR, con la media aritmética de los anchos de fisura obtenidos a través de los dos transductores magnéticos colocados para este propósito.

Tabla. 4.5 Comparación de anchos de fisura promedio OBR y transductores magnéticos.

Carga (kN)	w_{prom} (mm)	Media aritmética (mm)
50	0.063	0.079
70	0.103	0.116
90	0.138	0.115
110	0.179	0.157
130	0.223	0.248
150	0.272	0.319
170	0.330	0.388

En general, los anchos de fisura promedio de la Tabla 4.5, muestran una correlación aceptable al considerar que estos resultados fueron obtenidos por dos sistemas de medición con distintos niveles de precisión. Ello demuestra el potencial que tiene el sistema OBR y verifica experimentalmente el método de cálculo de ancho de fisura propuesto, para obtener valores de anchos de fisura promedio confiables.

Es importante hacer notar que los resultados obtenidos son a partir de niveles de carga en los cuales el sistema OBR es capaz de detectar y localizar el inicio de la fisuración. A partir de estos valores, se pudieron calcular anchos de fisura promedio para mayores niveles de carga, pero sin llegar al cálculo de anchos de fisura para estados de carga cercanos a la rotura de la losa, cuya carga experimental estuvo cerca a los 280 kN.

4.6 Modelo numérico no lineal de la losa de hormigón armado

Como se mencionó anteriormente, los anchos de fisura se calcularon a través de los transductores t1 y t2 colocados en el centro del vano de la losa. Por ello, en un principio los anchos de fisura obtenidos con el método OBR sólo pudieron ser comparados directamente en estos puntos. Posteriormente, con el objeto de representar el comportamiento de la losa fisurada en toda su longitud, se elaboraron distintos modelos de elementos finitos (MEF) de la losa, los cuales fueron calibrados con la información experimental proveniente de los LVDT y las galgas

extensométricas. Con los resultados de los MEF, se pudo extender la detección, localización y cálculo del ancho de fisura más allá de la sección centro luz, al utilizar la información experimental del sistema OBR, más allá del centro de la losa.

4.6.1 Justificación y características del MEF 2D

El comportamiento de estructuras de hormigón fisurado, puede realizarse a través de técnicas de análisis no lineal, junto con la elaboración de modelos de elementos finitos que representen la fisuración en forma discreta o extendida (DIANA, 2011). En el primer caso, los elementos que conforman una malla permanecen continuos y sin daño. Las fisuras solamente se pueden presentar en el contorno de los elementos y son modelizadas como desplazamientos discontinuos entre elementos, a través de elementos interfase que tienen que adaptarse en forma progresiva, a la dirección de propagación de la fisura. Por lo anterior, los análisis con elementos discretos suelen ser bastante laboriosos, y su uso se limita al seguimiento de algunas fisuras en particular, pero normalmente no se usan para modelizar patrones de fisuración global.

Los modelos de fisuración extendida o repartida, se definen básicamente por tres aspectos: un tipo de falla del material que puede ser constante o lineal, un criterio de transferencia de la fisuración a través de cada elemento finito que puede ser total, constante o variable, y una ley de comportamiento no lineal del material que puede ser frágil, lineal, o exponencial. El material fisurado, se considera como un continuo y la discontinuidad del campo de desplazamientos producto de la fisuración, se extiende en todo el elemento. Por lo tanto, estos modelos son una aproximación global de un fenómeno que es esencialmente discreto, pero con los cuales se obtienen resultados aceptables en aplicaciones prácticas (Rots, *et al.*, 1985, Rots, *et al.*, 1989). En este tipo de modelos, la aproximación a la dirección de la propagación puede ser fija, o con rotación. En el primer caso, la dirección de las fisuras es la misma en todo el proceso computacional, como suele ser el caso de la flexión. En el segundo caso, en los modelos se permite la rotación de los ejes principales de deformación, como generalmente corresponde a las fisuras producidas por la combinación de flexión y cortante (Rots, *et al.*, 1989).

La losa de hormigón se modelizó con elementos finitos 2D para estados planos de esfuerzos. Cada elemento finito presenta 9 puntos de integración de Gauss para conformar una malla con un total de 821 nudos y 239 elementos. Las barras de refuerzo longitudinal superiores e inferiores, fueron modelizadas con elementos con perímetro y sección transversal idéntica a las barras reales, y

consisten en 7 barras de 16 y 20 mm respectivamente. El recubrimiento es de 30 mm. El modelo MEF 2D de la losa, se puede observar en la Fig. 4.13

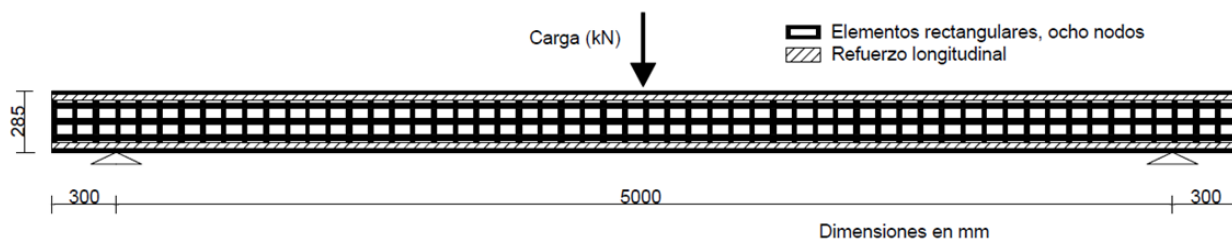


Fig. 4.13 Malla de elementos finitos.

Las propiedades mecánicas de los materiales (valores medios) fueron obtenidas a través de pruebas de laboratorio (Villalba 2010). La resistencia a compresión del concreto es $f_c = 51.31$ MPa, y una resistencia a la tracción $f_t = 4.00$ MPa. El módulo de elasticidad $E = 33\,147$ MPa. Respecto al acero de refuerzo, se utilizó un límite elástico $f_y = 550$ MPa.

Cuando una fibra óptica es utilizada como SFOD, generalmente y a manera de protección, tiene un recubrimiento con un espesor significativo. Este recubrimiento, y de manera conjunta con las capas de adhesivo que se producen cuando la fibra es adherida a una superficie, provocan que las deformaciones que se miden en la fibra, puedan diferir en forma significativa de aquellas que se producen en dicha superficie. En estos casos, las deformaciones obtenidas con el SFOD, se deben corregir con el fin de obtener distribuciones de deformación más exactas. Al respecto, se han desarrollado una gran diversidad de pruebas de laboratorio, y modelizaciones numéricas, con el fin de validar diferentes metodologías para evaluar estos efectos (Billon, *et al.*, 2014, Li y Li, 2013).

En el caso de la losa de hormigón, en el MEF 2D no se consideró la presencia de la fibra óptica adherida a la superficie de hormigón. Lo anterior fue debido a lo reducido tanto de las dimensiones de la fibra, como de las capas de adhesivo. La fibra que se utilizó como SFOD, era de 0.2 mm de diámetro, con una simple capa de poliamida y sin ningún tipo de espacial de recubrimiento. En la Fig. 4.14 se muestra una vista de la fibra utilizada como SFOD y la capa de adhesivo durante el ensayo.

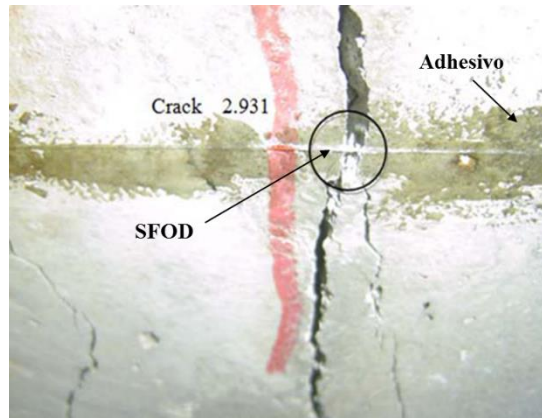


Fig. 4.14 Vista del SFOD y la capa de adhesivo (Villalba, 2010).

Para realizar el análisis no lineal hasta rotura con el modelo propuesto, se utilizó el programa DIANA (DIANA, 2011) con tres diferentes escenarios, los cuales se muestran en la Fig. 4.15

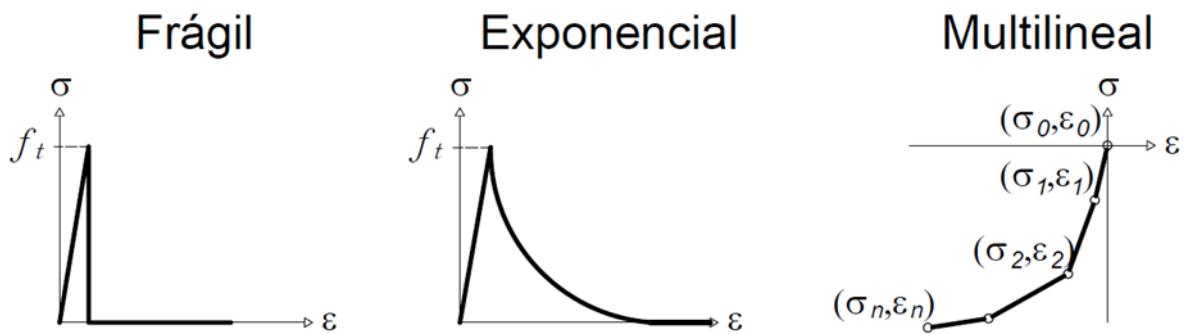


Fig. 4.15 Modelos de comportamiento del hormigón a tracción y compresión para los MEF

A la izquierda de la Fig 4.15 se observa el MEF1. En este modelo se consideró un comportamiento frágil del hormigón y una fisuración con rotación. Posteriormente, en el MEF2 nuevamente se consideró un comportamiento frágil del hormigón, pero con una fisuración fija. Por último en el MEF3 se consideró una fisuración fija y un comportamiento a tracción del hormigón con un decaimiento exponencial.

En todos los casos, la relación tensión-deformación en el hormigón a compresión, se consideró conforme se establece en la normativa española (EHE-08, 2011), y la cual se ajusta a una ley multilineal, como también se muestra en la Fig. 4.15.

4.6.2 Calibración del MEF 2D

En la Tabla 4.6 se presenta la comparación de las flechas obtenidas experimentalmente en el centro del vano de la losa, y aquellas obtenidas con los tres MEF.

Tabla 4.6 Flechas en el centro del vano de la losa

Carga (kN)	Flecha experimental (mm)	MEF 1 flecha (mm)	MEF 2 flecha (mm)	MEF 3 flecha (mm)
20	0.498	0.584	0.584	0.584
60	3.833	3.53	3.53	1.752
100	10.166	11.38	10.5	5.548
140	16.543	18.1	16.7	14.01
180	22.324	25.11	22.6	21.31
204-220	29.227	29.3	29.3	29.3

Se puede apreciar que con los MEF1 y MEF2 se obtienen resultados con una muy buen exactitud. Una comparación de las flechas experimentales y analíticas, se muestra en la Fig. 4.16

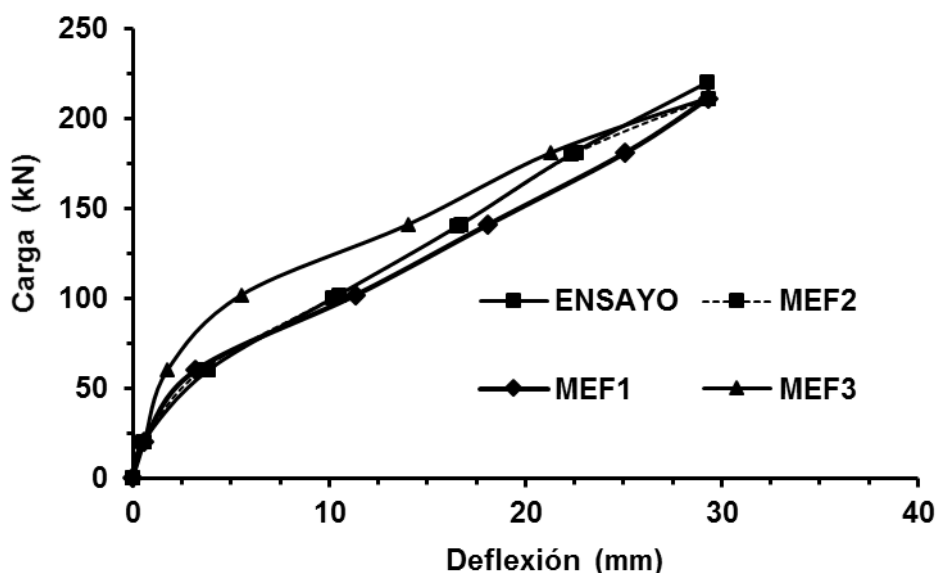


Fig. 4.16 Flechas experimentales y analíticas.

En la Fig. 4.17 se muestran con más detalle las flechas máximas obtenidas en el análisis no lineal paso a paso de cada uno de los tres modelos.

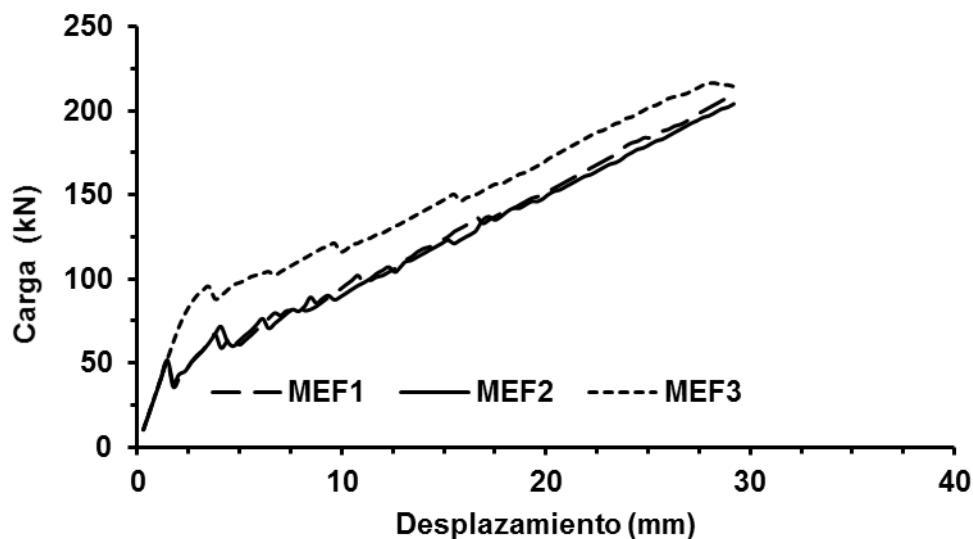


Fig. 4.17 Flechas máximas analíticas en el centro del vano.

Se puede observar claramente en los MEF1 y MEF2 un cambio de rigidez a partir de un nivel de carga de 50 kN, que corresponde con la aparición de las primeras fisuras en la losa. En el MEF3, dicho cambio de rigidez se presenta a un nivel de carga cercano a los 100 kN. Lo anterior muestra como los dos modelos MEF1 y MEF2, son los que mejor se ajustan a la respuesta obtenida experimentalmente. Con base en estos resultados, el MEF3 se descartó para futuras comparaciones.

4.6.3 Resultados: Patrón de fisuración, localización y ancho de fisura

En la Fig. 4.18 se muestra la distribución de deformaciones obtenidas a través del sistema OBR en la parte de SFOD denominado como sección 1, y que se encuentra en la parte superior comprimida de la losa. Estas deformaciones se comparan con los resultados obtenidos en la MEF2 para los niveles de carga de 50 y 110 kN respectivamente. Se puede apreciar que para el nivel de carga de 50 kN, el valor máximo experimental es de aproximadamente 222 $\mu\epsilon$, el cual es ligeramente superior al valor de 190 $\mu\epsilon$ que se ha obtenido con el modelo numérico.

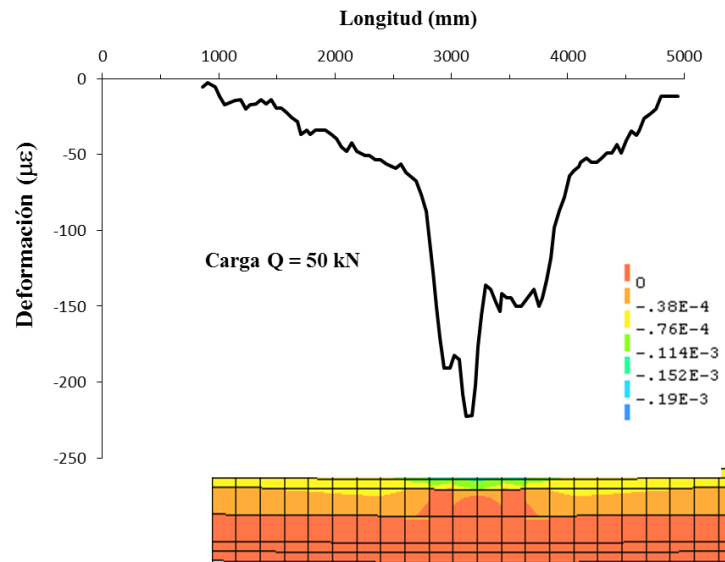


Fig. 4.18 Comparación numérica y experimental de la deformación a lo largo de la zona de compresión. Carga aplicada = 50 kN.

Para el nivel de carga de 110 kN, los valores experimentales OBR y numéricos son de 410 y 450 $\mu\epsilon$, respectivamente. De la Fig. 4.19 se puede concluir que la comparación es válida para toda la longitud de la fibra.

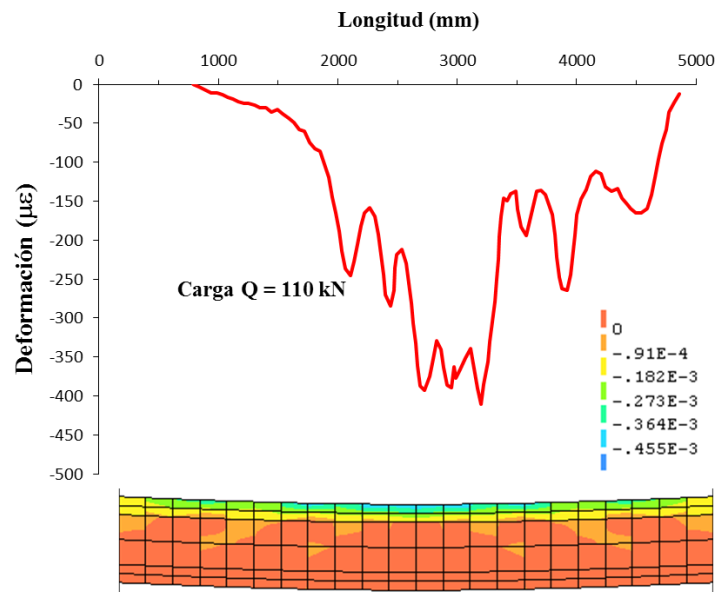


Fig. 4.19 Comparación de la deformación numérica y experimental a lo largo de la zona de compresión. Carga aplicada = 110 kN.

La máxima deformación a compresión obtenida en el hormigón fue 2400 $\mu\epsilon$, para un nivel de carga de 243 kN. Este valor de deformación es muy próximo al máximo de compresión para el hormigón,

el cual se encuentra entre las 2000 y 3500 $\mu\epsilon$, lo que refleja el hecho que el modo de fallo de la losa se debió a la falla en compresión del hormigón a un nivel de carga próximo a los 255 kN.

En las Tablas 4.7 y 4.8, se hace una comparación entre las deformaciones a tracción medidas en aquellos puntos en los cuales aparecen picos en los registros obtenidos con el sistema OBR y las predichas con los modelos numéricos MEF1 y MEF2.

Tabla 4.7 Micro deformaciones a 50 kN (zona 3, traccionada)

Picos : distancia desde la izq (mm)	$\mu\epsilon$ OBR	$\mu\epsilon$ MEF1	$\mu\epsilon$ MEF2
1953	0	0	0
2258	400	594	997
2456	1300	741	1134
2758	800	570	997
2932	1480	567	1223
2991	0	0	0
3185	1090	699	997
3382	1500	587	1223
3525	0	0	0
3795	0	0	0
4066	0	0	0
4270	0	0	0

Tabla 4.8. Micro deformaciones a 110 kN (zona 3, traccionada)

Picos: distancia desde la izq (mm)	$\mu\epsilon$ OBR	$\mu\epsilon$ MEF1	$\mu\epsilon$ MEF2
1953	800	2950	1814
2258	2250	3002	1910
2456	2450	2963	1385
2758	2590	2279	2086
2932	2040	2324	2091
2991	1550	1201	2962
3185	3450	2326	2126
3382	3500	802	2369
3525	2650	966	2962
3795	2240	2129	2022
4066	1700	1295	2031
4270	675	700	1090

Esta comparación se hace para los niveles de carga a 50 y 110 kN, y en el centro del vano de la losa. La primera columna en cada una de estas tablas indica la ubicación de cada fisura localizada durante el ensayo. En las Tablas 4.7 y 4.8 los valores iguales a cero corresponden a fisuras que aún no eran apreciables visualmente.

De las Tablas 4.7 y 4.8, se puede concluir que la mejor aproximación analítica a las deformaciones reales se obtiene con el MEF2, que implica un patrón de fisuración sin rotación, como era de esperarse en un ensayo a flexión. En la Fig. 4.20 se hace la comparación entre un patrón de fisuración obtenido en forma experimental, y el obtenido numéricamente con el MEF2 para un nivel de carga de 110 kN.

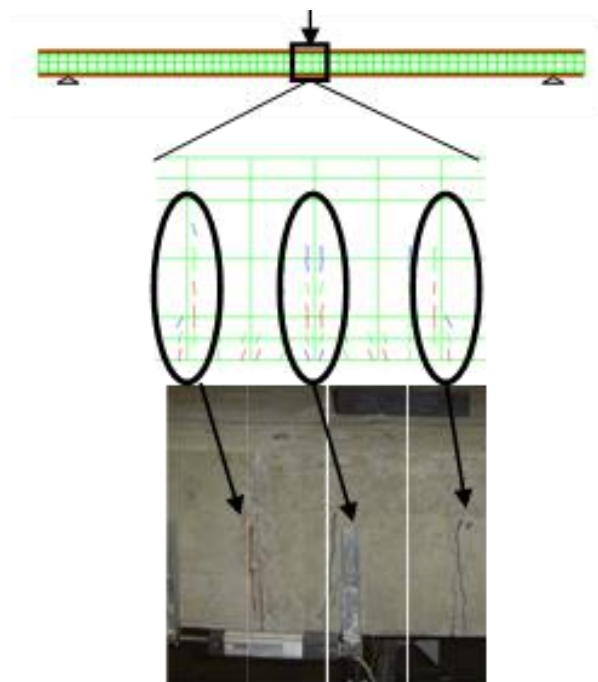


Fig. 4.20 Comparación de patrones de fisuración analíticos y experimentales al centro del vano de la losa.

También, para los niveles de carga de 50 y 110 kN, en la Fig. 4.21 se comparan las deformaciones obtenidas con el sistema OBR y a través del MEF2.

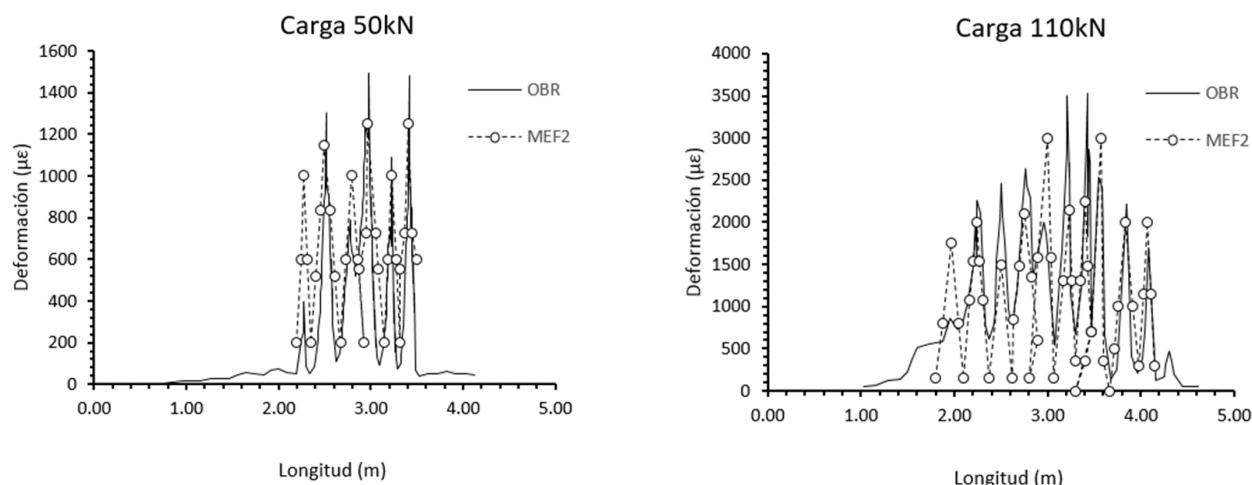


Fig. 4.21 Comparación de valores de deformaciones numéricas y experimentales.

Se puede apreciar nuevamente una buena correspondencia, lo que indica un comportamiento aceptable del sistema OBR para medir deformaciones incluso en zonas fisuradas.

En la Fig. 4.21, los valores teóricos se obtuvieron al unir las deformaciones de fisuración obtenidas en los puntos de interpolación de Gauss y tomando en cuenta las dimensiones de los elementos finitos correspondientes. La localización de estos puntos en el MEF es la más cercana a los picos de deformación identificados en el ensayo.

A través del sistema OBR, se detectaron los primeros estados de fisuración a un nivel de carga de 50 kN, lo cual muestra la gran potencial del sistema OBR en la detección temprana y oportuna de fisuras en superficies de hormigón.

Con relación a los anchos de fisuras, éstos se compararon solamente en el centro de la losa, donde se ubicaron sensores tradicionales. Estos anchos de fisura, se muestran en la Tabla para diferentes niveles de carga y se comparan con los valores obtenidos con el sistema OBR y los obtenidos con los modelos MEF1 y MEF2. Nuevamente el MEF2 muestra los mejores resultados.

Tabla 4.9 Anchos de fisura en el centro del vano.

Carga (kN)	Ancho de fisura Transductores (mm)	Ancho de fisura OBR (mm)	Ancho de fisura MEF1 (mm)	Ancho de fisura MEF2 (mm)
50	0.079	0.062	0.049	0.052
60	0.094	---	0.07	0.106
70	0.116	0.112	0.132	0.138
90	0.115	0.149	0.126	0.118
100	0.13	---	0.174	0.152
111	0.157	0.19	0.202	0.206
130	0.248	0.237	0.23	0.24
140	0.284	---	0.245	0.259
150	0.319	0.298	0.304	0.296
170	0.388	0.354	0.422	0.371
180	0.42	---	0.482	0.409
220	0.594	---	0.552	0.533

4.7 Conclusiones

Con el uso de sistemas de monitorización con SFOD, las limitaciones de los sensores discretos para localizar y medir anchos de fisura pueden ser superadas. Con lo anterior, se puede evitar la extrapolación de resultados y en algunos casos el uso de sofisticados algoritmos y técnicas de análisis estructural, para diagnosticar a nivel local y global toda una estructura.

Los datos experimentales del ensayo permitieron calibrar el modelo no lineal de la losa de hormigón. Una vez calibrado, el modelo se utilizó para predecir la localización y el ancho de fisuras en diferentes partes de la losa. Lo anterior se comprobó a través de la comparación de diferentes resultados experimentales.

El sistema OBR instalado en la losa permitió detectar la formación de fisuras, su localización, y posteriormente, establecer un método de cálculo del ancho de fisura promedio basado únicamente en la monitorización continua de la deformación unitaria a lo largo de un SFOD.

Los resultados obtenidos con el método OBR, muestran una gran correlación con los valores experimentales obtenidos con el resto de los sensores, así como con la inspección visual y los valores teóricos de los modelos de elementos finitos.

CAPÍTULO 5

MÉTODO OBR PARA LA MONITORIZACIÓN DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN SUJETOS A CORTANTE MEDIANTE FIBRA ÓPTICA DISTRIBUIDA

5.1 Introducción

Este capítulo comprende la descripción de una propuesta metodológica de monitorización mediante SFOD de un comportamiento estructural de gran complejidad como es la respuesta a cortante en vigas de hormigón.

Primeramente, se define brevemente la problemática que existe en la detección de la fisuración por esfuerzos cortantes en elementos de este material estructural. Posteriormente, se describen algunas de las metodologías experimentales tradicionales para estudiar este fenómeno y la forma en la cual se obtiene la información experimental, haciendo énfasis en sus principales limitaciones.

Bajo este marco, se propone un método de caracterización de la fisuración por cortante en vigas de hormigón. Este método se basa en la información experimental obtenida a través del uso de SFOD y un sistema de medición opto-electrónico OBR.

El método OBR comprende la detección y localización de puntos de fisuración por cortante, por medio de uno o dos SFOD que conforman una malla en 2D adherida a una región de un elemento de hormigón sujeta a esfuerzos cortantes.

La parte central del método OBR radica en aprovechar la continuidad y la alta resolución espacial de la información que se obtiene a través del sistema de medición OBR, para calcular el ancho promedio de fisuras producidas por cortante en elementos de hormigón.

En la parte final de este capítulo y para llevar a cabo la verificación de esta propuesta, se describe la implementación del método OBR. Esta etapa se conformó a través de una serie de pruebas de laboratorio en tres vigas de HPP de 8 m de longitud. Las tres vigas ensayadas primeramente se instrumentaron con sensores discretos (Bairán, *et al.*, 2014, Celada, 2015).

Posteriormente y de forma complementaria a dicha instrumentación, con el fin de monitorizar en forma continua la distribución de las deformaciones durante los ensayos, se utilizaron SFOD adheridos a la superficie de hormigón de cada una de las tres vigas. Dos de estas vigas fueron ensayadas a cortante, y una tercera viga fue ensayada primero a cortante y posteriormente a flexión.

Cabe señalar que la información obtenida con el método OBR puede complementarse con la elaboración a futuro de modelos numéricos que sirvan para optimizar y potencializar el uso de la información experimental obtenida, y también para confirmar o aclarar parte de la misma. En este sentido, la elaboración de un modelo a cortante para describir patrones de fisuración es un proceso detallado, que por sí solo es un tema de investigación.

5.2 La fisuración a cortante en elementos de hormigón

En los elementos estructurales de hormigón sujetos a cortante, las fisuras se presentan en forma diagonal con una cierta inclinación respecto al eje longitudinal del elemento. Lo anterior se debe a que los esfuerzos principales no se presentan en la misma dirección de los ejes horizontal y vertical del elemento estructural. Este mecanismo de fisuración es más complejo que la fisuración producida por una fuerza de tracción o la flexión pura. La fisuración diagonal no es perpendicular a la armadura vertical y horizontal. Comparado con el caso de flexión, donde las fisuras aparecen prácticamente en forma ortogonal respecto al eje longitudinal del elemento estructural, en el caso del cortante, la inclinación de las fisuras es un parámetro adicional que hay que determinar. Por esta razón, en la evaluación de los patrones de fisuración por cortante, no solamente la detección del inicio de la fisuración, su localización y el ancho de fisura son de importancia, también los ángulos de inclinación de las fisuras por cortante deben ser medidos sin conocimiento previo de la zona en la cual se presentarán las fisuras. Todo ello representa una serie de dificultades adicionales a tener en cuenta cuando se pretenda monitorizar a cortante una estructura de hormigón.

De forma general, para caracterizar la fisuración por cortante se establecen los siguientes parámetros: se define un ángulo θ respecto al eje horizontal del elemento estructural, como se muestra en la Fig. 5.1. En función de dicho ángulo, se obtiene la inclinación de la fisura. El ancho de fisura por cortante en un elemento de hormigón y definido como w_d , se puede representar por dos componentes w_{mx} y w_{my} . A su vez en la fisuración por cortante, existe una componente de deslizamiento denominada s_d que se debe a la cizalladura que se presenta durante la apertura de una fisura. Lo anterior, se observa también en la Fig. 5.1.

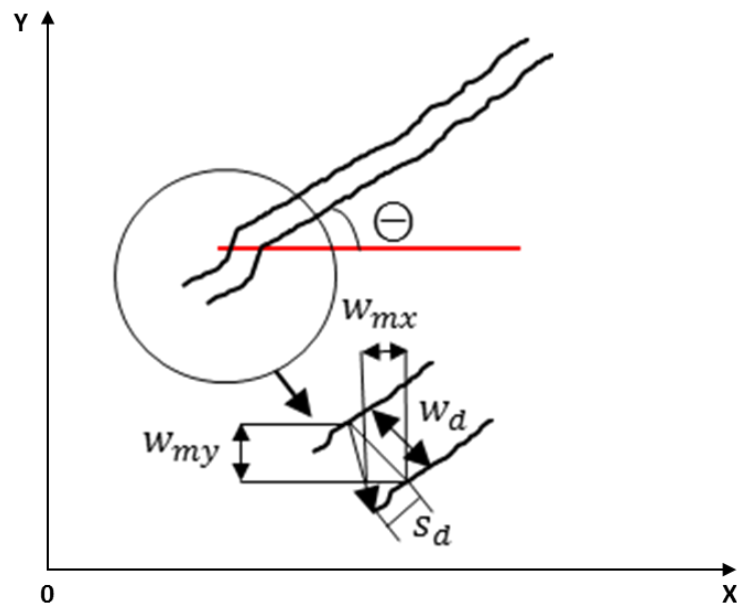


Fig. 5.1 Representación esquemática de la fisuración por cortante en el hormigón.

5.3 Metodologías experimentales para la obtención del ancho de fisura en elementos de hormigón sujetos a cortante

Durante un ensayo de laboratorio a cortante, para la obtención de los parámetros anteriores se ha recurrido al uso combinado de distintos tipos de sensores e instrumentos de medición, con los cuales se han establecido algunas metodologías para la obtención de los patrones de fisuración por cortante y el ancho de fisura.

En estas metodologías, una de las grandes limitaciones que existe es el uso de sensores discretos, generalmente galgas extensométricas, con las cuales no es posible la obtención de anchos de fisura. Para cubrir dicha limitación, se tiene que recurrir al uso de una gran cantidad de sensores discretos con el propósito de medir en el mayor número de puntos posibles, y en ocasiones conformar rosetas de deformación a través de las cuales, determinar el ancho de las fisuras.

Estos procedimientos de instrumentación suelen resultar complicados y muy laboriosos, ya que consumen tiempo en la instalación de los instrumentos, y en la inspección de los elementos durante

la realización del ensayo. En la Fig. 5.2 se muestran un ejemplo en los cual se utilizaron galgas extensométricas en la superficie de los elementos de hormigón ensayados.

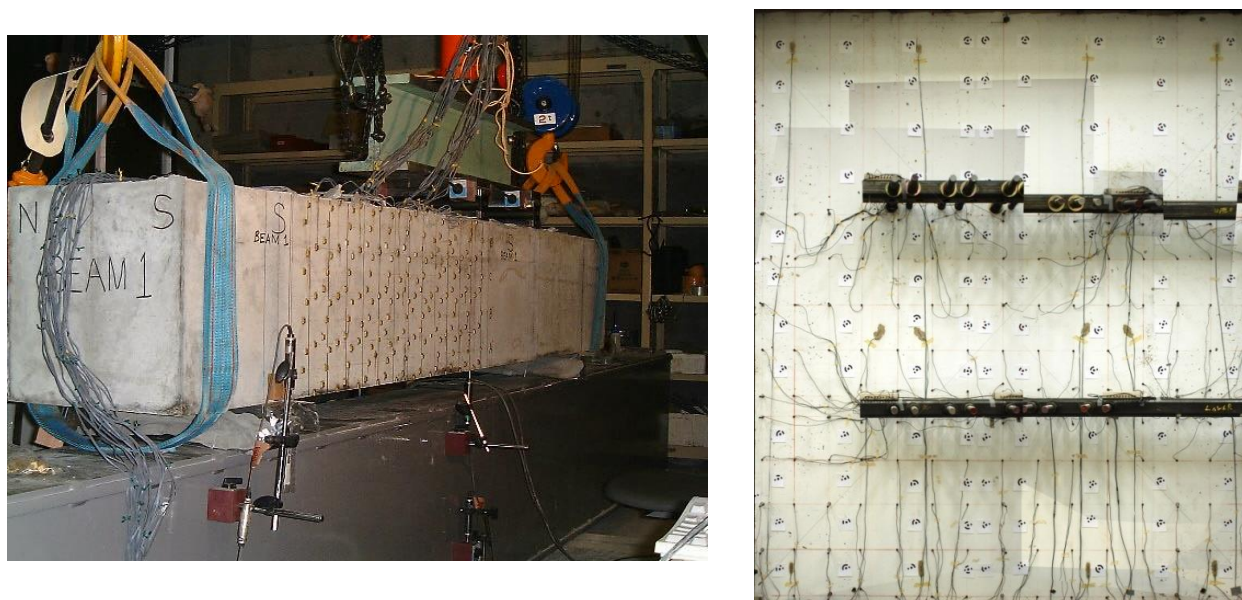


Fig. 5.2 Instrumentación con galgas extensométricas de ensayos a cortante de una viga y un muro de hormigón (Piyamahant, 2002, y Van Haukelem, 2010).

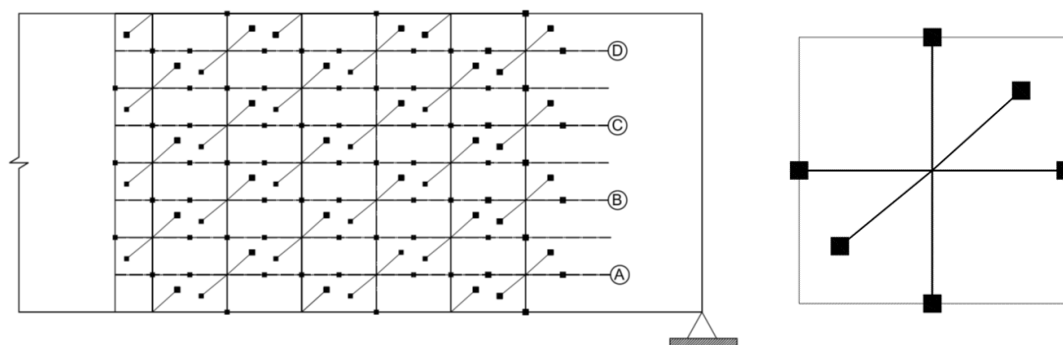


Fig. 5.3 Conformación de rosetas de deformación con galgas extensométricas para el ensayo a cortante de una viga de hormigón (Piyamahant, 2002).

En algunas ocasiones se pueden conformar rosetas con las cuales se pueden obtener las deformaciones producidas en dos direcciones perpendiculares, y una tercera con cierta inclinación. En las Fig. 5.3 se pueden observar un ejemplo de la conformación de estas rosetas.

Otra alternativa para la caracterización de los patrones de fisuración por cortante, es el uso de LVDT o potenciómetros, los cuales se pueden utilizar en forma combinada con rosetas de deformación. En la Fig. 5.4 se muestra un ejemplo de esta combinación.

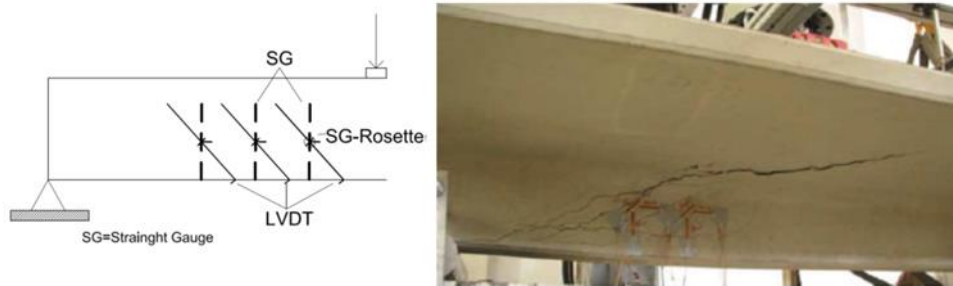


Fig. 5.4 Conformación de rosetas de deformación con LVDT embebidos para el ensayo a cortante de una viga de hormigón (Stoerzel y Randal, 2015).

Cabe mencionar que la aplicación de este tipo de rosetas, se limita a la obtención de información en una zona determinada. Generalmente, estas rosetas se colocan en puntos en los cuales se prevé se presentaran esfuerzos de magnitud importante. Su rango de medición está limitado por la longitud del instrumento. Por ello, siempre existe la posibilidad de perder información del comportamiento estructural que esté fuera o muy alejado de la conformación de la roseta.

En relación a la obtención del ancho de fisuras, existen distintas metodologías para de medir dichos anchos. La forma más común y práctica consiste en comparar los anchos de fisura que se presentan en la superficie de hormigón, con anchos de fisura establecidos en una pequeña lámina manual generalmente plástica y transparente, como la que se muestra en la Fig. 5.5.



Fig. 5.5 Obtención del ancho de fisura con una lámina plástica y transparente.

Para obtener los anchos de fisura a través de esta técnica, es necesario por seguridad, que el ensayo quede suspendido durante el tiempo que dure la inspección del elemento en estudio y la toma de lecturas. Lo anterior puede consumir un periodo considerable de acuerdo al nivel de detalle con el que se realicen los levantamientos de información. También, hay que tener en cuenta que en la toma de lecturas, los errores pueden ser frecuentes, al tratarse de una inspección visual.

Para establecer metodologías más precisas en el cálculo experimental de los anchos de fisura, se recurre al uso de instrumentos con precisión submilimétrica. Un ejemplo de estos instrumentos, son los deformímetros mecánicos desmontables, cuyo mayor potencial está en su gran precisión de 0.001 mm. Un ejemplo de estos instrumentos y su aplicación en ensayos de cortante se muestra en la Fig. 5.6.

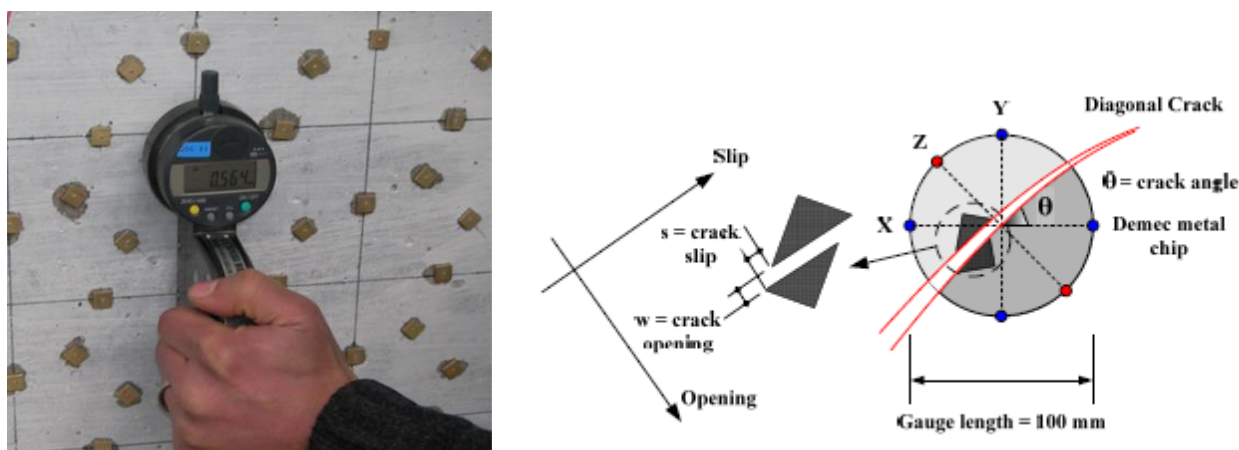


Fig. 5.6 Obtención de los desplazamientos de fisuración por cortante con deformímetro desmontable (Zakaria, 2009).

Para medir los desplazamientos en el hormigón en zonas de fisuración por cortante, al igual que en el uso de galgas, se requiere de la definición de una serie de puntos de medición a cierta distancia, con el fin de conformar rosetas que permitan la colocación del deformímetro desmontable.

Una vez establecidos estos puntos de medición, se podrán obtener los desplazamientos en dos direcciones ortogonales con relación a los ejes de elemento en estudio, y también un tercer desplazamiento con un determinado ángulo de inclinación respecto a los dos anteriores.

Con este instrumento se tiene la posibilidad de obtener los anchos de fisura que se presentan durante el desarrollo de un ensayo. En su aplicación, al igual que con otras técnicas de medición experimental de fisuras, se tiene el inconveniente de tener que acercar el instrumento a la superficie de hormigón, lo cual como también ya ha sido mencionado, implica el tener que detener el ensayo, para la realización de la medición no solamente en una, sino en una gran cantidad de fisuras. Por lo anterior, dicho procedimiento puede resultar muy laborioso.

Con mayores posibilidades de visualización, pero menor precisión en el cálculo del ancho de fisura, se encuentra el uso de un microscopio portátil. Este instrumento cuenta con una precisión de 0.01 mm, y con su uso se puede obtener el ancho de fisura de una forma muy detallada. Su aplicación en la obtención de los anchos de fisura durante el ensayo de un elemento de hormigón, se presenta en la Fig. 5.7.

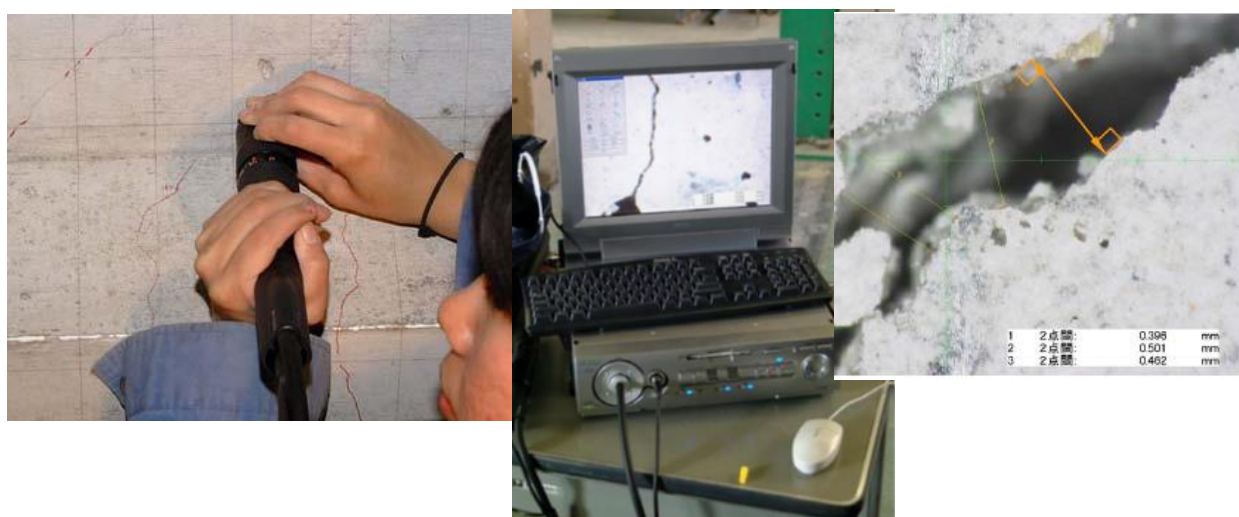


Fig. 5.7 Obtención de anchos de fisura por cortante con un microscopio portátil (De Silva, 2008).

En la descripción de las metodologías anteriores, destaca la gran precisión con la que se pueden calcular los anchos de fisura a través de los instrumentos mencionados. Sin embargo en estas metodologías, se requiere del uso de una cantidad considerable de sensores para poder lograr la identificación de los patrones de fisuración por cortante. También cabe mencionar, que el tiempo en la preparación de ensayos con estas metodologías, generalmente es elevado.

Por lo anterior, en esta investigación se propone el uso de una instrumentación y monitorización OBR, que puede ser una alternativa con la cual se optimice el tiempo de instalación de los sensores

y de preparación de un ensayo, y se obtenga una riqueza de información, que sería difícil de obtener con una instrumentación discreta y de tipo visual.

5.4 Método OBR para la caracterización de la fisuración por cortante

De forma similar al cálculo del ancho de fisura en elementos a flexión que se estableció en el capítulo 4, el método OBR para el caso de cortante se basa en el análisis de la distribución de deformaciones unitarias a lo largo de un SFOD. Sin embargo, debido a la inclinación que caracteriza a las fisuras por cortante, para detectar, localizar y posteriormente cuantificar el ancho de fisura, se debe establecer un método de monitorización que permita determinar la distribución de las deformaciones en al menos dos direcciones perpendiculares entre sí. Así, para el caso de elementos de hormigón sujetos a cortante, se propone un arreglo con uno o dos SFOD para formar una malla rectangular en 2D dentro de la zona en la cual se espera se presenten dichas fisuras. Una representación esquemática de esta malla, se muestra en la Fig 5.8.

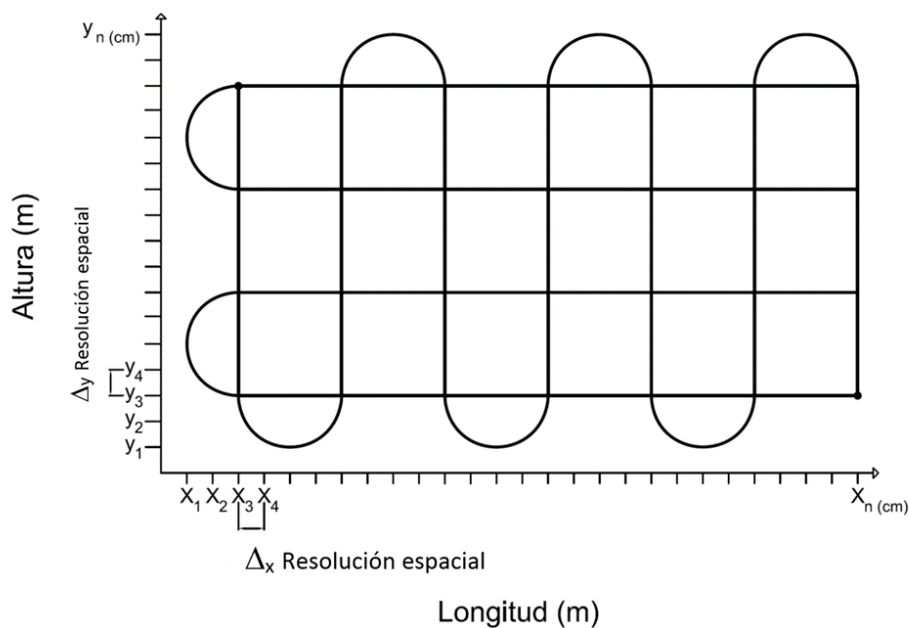


Fig.5.8 Malla rectangular en 2D conformada por el SFOD para la caracterización de la fisuración por cortante.

Para llevar a cabo la identificación y localización de los patrones de fisuración, en primer lugar se define un plano coordenado X-Y. En la malla 2D conformada por el o los SFOD, se identifican tramos horizontales y verticales, y se establecen distintas secciones dentro de la malla 2D.

Lo anterior con el fin de establecer un sistema de referencia y ubicar todos los puntos que conforman el SFOD dentro de la estructura monitorizada, por medio de la asignación de un conjunto de coordenadas (x_n, y_n) .

Una vez que se ha establecido el sistema de referencia, se procede a identificar tanto los distintos tramos horizontales como los tramos verticales que conforman la malla 2D. A través de esta identificación se pueden realizar lecturas de la distribución de las deformaciones unitarias a lo largo de todo el SFOD tanto en dirección horizontal, como vertical. De esta forma se obtiene la variación de las deformaciones en dos direcciones perpendiculares entre sí. La identificación de cualquier punto del SFOD se realiza a través de sus coordenadas (x_n, y_n) , las cuales están en función de la resolución espacial asignada en el sistema OBR. La resolución espacial es la distancia más pequeña en la cual una variación de la deformación puede ser detectada en toda la longitud de un SFOD (Rogers, 1999). En el caso de la malla 2D, la resolución espacial se traduce en el incremento Δx y Δy que hay entre las coordenadas x_n, y_n en ambas direcciones, y que se indican en la Fig. 5.8.

Durante el proceso de captura de datos, en el momento en el cual los niveles de deformación son superiores a la deformación unitaria máxima por tracción en el hormigón, los puntos en los cuales aparecen fisuras, se podrán identificar a través de las lecturas obtenidas con el sistema OBR. Dichas fisuras en muchas ocasiones, son imperceptibles por inspección visual.

Posteriormente y a través del estudio de la información que se obtiene, se puede lograr de manera progresiva, el trazo del patrón de fisuración en la zona instrumentada con uno o más SFOD. En este sentido, se aprovecha la historia de los registros de deformación que se obtienen a lo largo de la fibra, para identificar el inicio de la fisuración y su evolución en función del tiempo, asociada a un nivel de carga determinado.

Cabe señalar que conforme el nivel de carga aumenta, en el caso de los elementos de hormigón sujetos a cortante, los patrones de fisuración se vuelven más complejos. Lo anterior, dificulta el trazo de las fisuras conforme el nivel de carga aumenta. En este sentido, y al tratarse de una primera aplicación del sistema OBR en este tipo de estudios, para la comprobación del trazo de los patrones de fisuración, se realizó un registro fotográfico a lo largo de todos los ensayos, con el fin de tener un apoyo visual en el proceso de trazo de los patrones de fisuración por cortante.

Para fines del cálculo del ancho de fisura por cortante, al igual que en el caso de flexión, se recurre a la obtención del área bajo la curva de los registros continuos de deformación unitaria. Sin embargo, debido a la diferencia entre los mecanismos que producen la flexión y el cortante, el procedimiento para el cálculo del ancho de fisura en el caso de cortante presenta una diferencia importante.

En la Fig 5.9, se muestra en la parte izquierda, un registro de deformación OBR obtenido en un ensayo a flexión, y en la parte derecha un registro OBR obtenido en un ensayo a cortante.

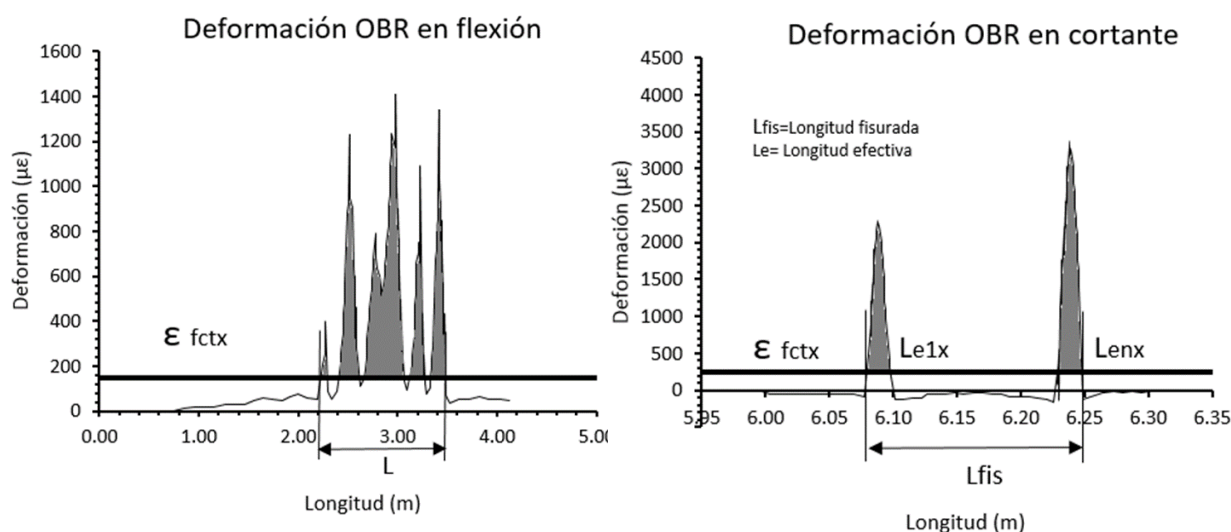


Fig. 5.9 Registros de deformación OBR en flexión y cortante.

En ambos registros se distinguen picos asociados a la presencia de fisuras. También en estos registros, se ha trazado una línea horizontal, que corresponde a la deformación a partir de la cual se supera la resistencia a tracción del hormigón (ϵ_{fctx}) y que se denomina umbral de deformación por tracción.

Debajo de esta línea, se observa una diferencia entre los dos registros. En el registro del ensayo a flexión, las deformaciones entre fisuras permanecen con valores positivos, lo cual implica que el hormigón entre fisuras contribuye en la rigidez a la tracción que presenta el elemento. Este efecto se conoce como rigidización por tracción (Ghali, *et al.*, 2012), y produce que en el método OBR para el cálculo promedio del ancho de fisura por flexión, la longitud característica de fisuración L , se considere en toda la zona afectada por la presencia fisuras, tal como se detalla en el capítulo 4.

En el caso del registro del ensayo por cortante, y como también se puede apreciar en la gráfica derecha de la Fig. 5.9, el efecto de rigidización por tracción no se presenta. Lo anterior se explica debido a que el mecanismo de distribución de esfuerzos que se produce en cortante, genera que el

hormigón entre fisuras solamente trabaje en compresión. Este mecanismo es la base de la llamada analogía de la celosía, a través de la cual se han desarrollado muchos de los modelos relacionados con los efectos del cortante en estructuras de hormigón.

En este mecanismo, la fisuración solamente se produce en aquellos puntos en los cuales, las deformaciones son superiores a la máxima deformación por tracción del hormigón (ϵ_{fctx}). Es por lo anterior, que en el caso del cortante se debe considerar primero, una longitud característica de fisuración denominada L_{fis} , y que comprende toda la zona en la cual se presentan fisuras por cortante. Posteriormente se deben tomar en cuenta una o varias longitudes efectivas que se denominan L_{enx} o L_{eny} , según sea la dirección de análisis, y que comprenden solamente la zona en la que se supera la deformación a tracción del hormigón. Ambos tipos de longitud se muestran en la gráfica derecha de la Fig. 5.9.

Es así como en el caso de un elemento de hormigón sujeto a cortante, el trazo del patrón de fisuración se lleva a cabo a través de la malla 2D. Como se describe en la Fig. 5.10, en esta malla se detectan una o más fisuras en forma simultánea y en dos direcciones ortogonales X e Y. Generalmente los registros de deformación en dirección horizontal, presentan un estado de deformaciones en compresión en todos los puntos del SFOD, excepto en aquellos en los cuales se han detectado fisuras. A estos registros se les asocia la dirección X y una sección del SFOD que se denomina con una letra, a partir de la letra A y en forma descendente, respecto a la altura de la viga (Fig. 5.10).

Para definir la integración del área bajo la curva en una sección horizontal determinada del SFOD y aplicar el método OBR de cálculo de ancho de fisura, al registro de deformación se le asigna como límite, la deformación asociada a la tracción máxima del hormigón, la cual se define en función del ángulo θ como $\epsilon_{fctx} = \epsilon_{fct} * \text{sen}\theta$, como se muestra en la Fig. 5.10. De igual manera se procede en cada una de las diferentes secciones horizontales.

Hay que tomar en cuenta que, en un principio, el ángulo θ es desconocido, pero, tal como se verá posteriormente, puede ser también obtenido gracias a la monitorización con SFOD.

Posteriormente, se lleva a cabo un proceso similar con los registros de deformación verticales. En estos registros la asignación de la longitud de fisuración L_{fis} se realiza igual que en el caso de flexión. Lo anterior, debido a que en dirección vertical, generalmente aparece tracción en diversos puntos del SFOD.

A las diferentes secciones verticales del SFOD se les asocia la dirección Y del sistema de referencia, y para su identificación, se les asigna un número a partir de 1y, como se describe también en la Fig. 5.10. En esta dirección el límite a partir del cual se realiza la integración del registro OBR es el valor de deformación máxima de tracción $\epsilon_{fcty} = \epsilon_{fct} * \cos\theta$

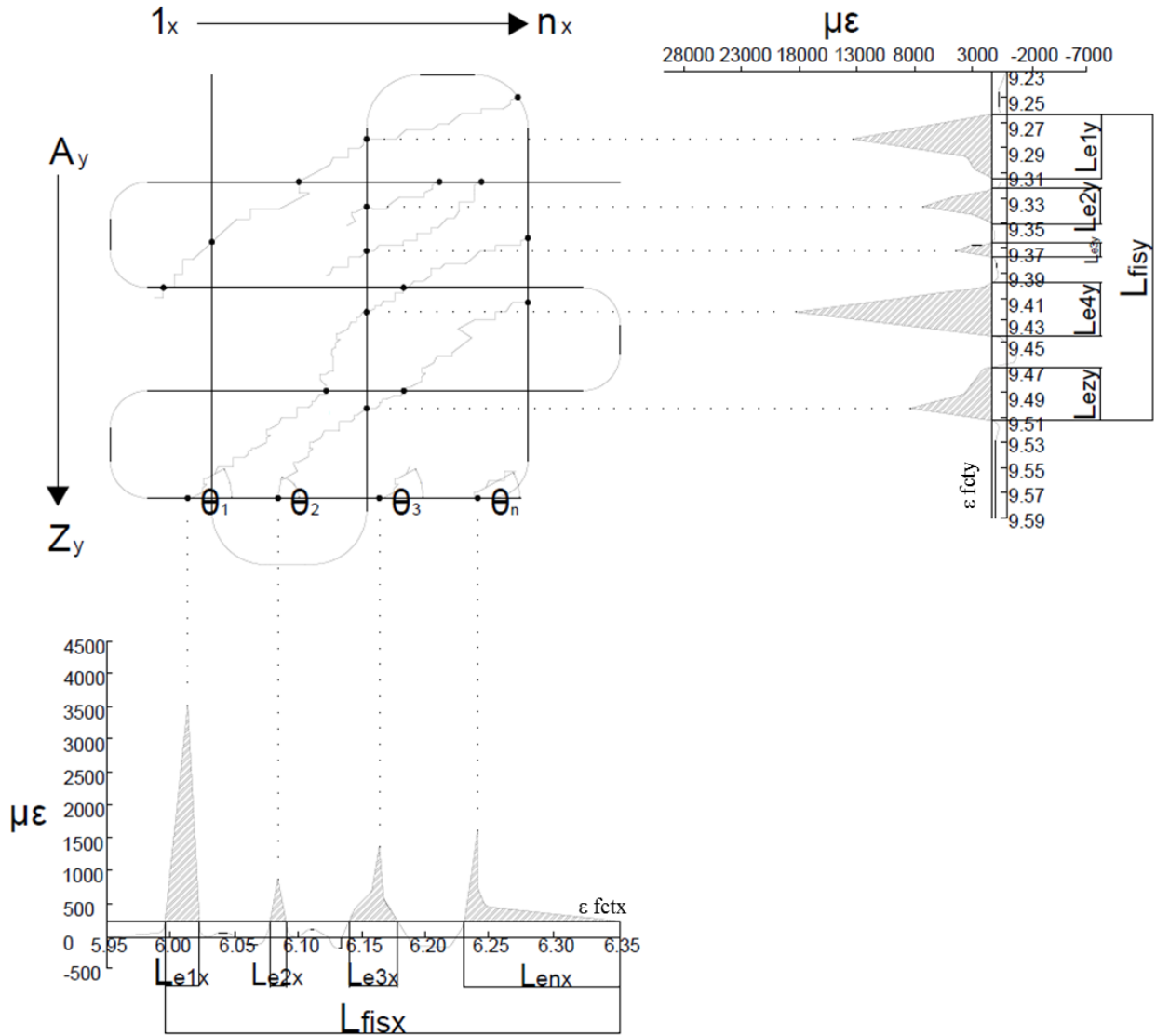


Fig. 5.10 Procedimiento para la localización, trazo y cálculo de anchos de fisura por cortante.

De esta forma, para el caso del cortante se puede establecer la ecuación 5.1 que será aplicada para las dos direcciones X, Y.

$$\epsilon_{prom\,x,y} = \frac{1}{L_{x,y}} \int_0^{L_{x,y}} \epsilon_{OBRx,y} \, dx, dy \quad (5.1)$$

Donde

$$L_{x,y} = \sum_{i=1}^n L_{nx,y}$$

La cual representa, la suma de cada una de las longitudes en las cuales se presenta una fisura en una zona determinada del SFOD.

Para considerar el número de fisuras en una longitud L determinada, la deformación promedio $\epsilon_{promx,y}$, tanto en dirección X como en Y , también se puede establecer a partir de la ecuación 5.2.

$$\epsilon_{promx,y} = \epsilon_{fctx,y} + \frac{\sum wx,y}{Lfisx,y} \quad (5.2)$$

En la ecuación 5.2 se toma en cuenta la zona en la cual se presenta la fisuración, al considerar la $L_{fisx,y}$ y en número de fisuras que se presentan en esa longitud a través de la sumatoria $\sum wx,y$. La deformación $\epsilon_{fctx,y}$, es el umbral a partir del cual, se presentan las fisuras.

Si se igualan las ecuaciones (5.1) y (5.2), se puede establecer la ecuación (5.3) y obtener el valor de la sumatoria $\sum wx,y$

$$\frac{1}{L_{x,y}} \int_0^{L_{x,y}} \epsilon_{OBRx,y} dx dy = \epsilon_{fctx,y} + \frac{\sum wx,y}{Lfisx,y} \quad (5.3)$$

En la ecuación 5.3, $\sum wx,y$ comprende la suma de los anchos de todas las fisuras w_x o w_y que se presentan dentro de la longitud fisurada.

De esta forma, se define un ancho de fisura promedio en cada dirección x,y que se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$w_{promx,y} = \frac{\sum wx,y}{N} \quad (5.4)$$

En la ecuación 5.4, N es el número de fisuras y se obtiene al contar los picos que se presentan en los perfiles de deformación continuos de los resultados experimentales OBR.

Finalmente, el ancho de fisura promedio se obtiene de la resultante de los anchos de fisura obtenidos en las dos direcciones X e Y, a través de la ecuación (5.5).

$$w_{prom} = \sqrt{w_{promx}^2 + w_{promy}^2} \quad (5.5)$$

El poder contar con una historia detallada de la progresión del patrón de fisuración por cortante resulta un recurso muy importante en términos de MSE. La información que se obtiene de los puntos con y sin fisuración es una guía importante para poder analizar y conocer con muy buena precisión la distribución de las deformaciones en la zona instrumentada con SFOD.

Generalmente en los estudios relacionados con el comportamiento a cortante de elementos de hormigón, se utiliza el patrón de fisuración final por cortante para analizar los resultados. Lo anterior, se debe a la dificultad que implica poder determinar en forma gradual, la conformación de los patrones de fisuración por cortante a través de la inspección visual y los sensores discretos a medida que se va aumentando el nivel de carga.

5.5 Implementación de método propuesto. Ensayos a cortante y flexión de vigas HPP

Los tres ensayos a cortante consistieron en monitorizar el comportamiento de cada una de las vigas a distintos niveles de carga de servicio, y finalmente producir la rotura del elemento. Lo anterior se llevó a cabo en forma cíclica y gradual con una velocidad de carga controlada por desplazamientos. Se realizaron cinco ciclos de carga y descarga a niveles de carga de servicio, antes de la rotura de cada viga. Durante estos ensayos, se obtuvieron lecturas de la deformación de las vigas con el sistema OBR. La captura de la información con el sistema OBR se realizó a intervalos de muestreo de 1 a 5 s durante el primer ensayo, y con intervalos de 5 s a partir del segundo de los cuatro ensayos realizados, considerando el ensayo a flexión.

Con la información obtenida a lo largo del SFOD, se estableció la distribución de las deformaciones con relación al nivel de carga para cada una de las vigas. En todos los ensayos, se

pudo lograr buena precisión en la identificación y localización de fisuras, y se establecieron los correspondientes patrones de fisuración por cortante y flexión, pero solamente hasta cierto nivel de carga.

5.5.1 Objetivo de los ensayos

El objetivo principal de esta serie de ensayos fue evaluar y verificar la capacidad del sistema OBR para monitorizar el comportamiento de elementos de hormigón sujetos a la acción predominante de un esfuerzo cortante, y corroborar su aplicación en miembros de hormigón sujetos a flexión. Cabe mencionar que en el caso del cortante, es la primera vez que se usa este sistema de monitorización en el estudio de este tipo de comportamiento estructural, el cual es sumamente complejo.

Posteriormente, con la información experimental obtenida con el sistema OBR se analiza el comportamiento a cortante de tres vigas de HPP, y posteriormente se estudia el comportamiento a flexión de una de estas tres vigas. Finalmente, se establecen algunas de las principales ventajas y limitaciones de la aplicación de los SFOD utilizados en esta tesis doctoral, y para esta clase de pruebas experimentales.

5.5.2 Metodología experimental

Los ensayos que se describen en este trabajo, son solamente una parte de una serie de ensayos en colaboración con un extenso estudio experimental y analítico acerca del comportamiento a cortante y flexión de elementos isostáticos de HPP (Bairán, 2012, Celada, 2015). En dicho estudio, se ensayaron un total de ocho vigas, aunque sólo 3 de ellas se instrumentaron con SFOD y son las que se van a analizar en esta tesis doctoral. Se estableció ensayar cada viga dos veces. Una primera serie consistió en ensayar las ocho vigas a cortante, con el fin de no tener que cambiar las condiciones de apoyo en cada ensayo. Posteriormente, en una segunda serie y variando las condiciones de apoyo con relación a los ensayos a cortante, las mismas vigas fueron ensayadas a flexión.

Los ensayos a cortante se realizaron con un arreglo a tres puntos y aplicando una carga a una distancia de dos metros respecto de uno de los apoyos de cada viga. Posteriormente, de las tres vigas ensayadas a cortante, la denominada I3, también se ensayó con un arreglo a cuatro puntos a flexión. En las Figs. 5.11 y 5.12, se muestran esquemáticamente la configuración en la que fueron ensayadas las tres vigas, primero a cortante y posteriormente la viga I3 a flexión.

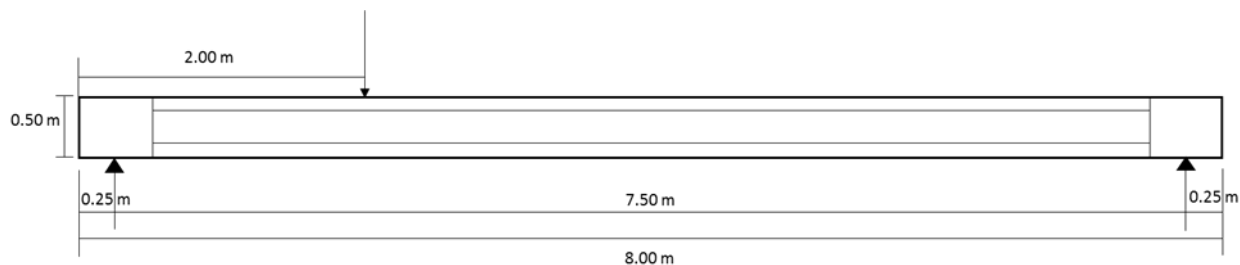


Fig. 5.11. Esquema de los ensayos a cortante de las vigas de I-1, I-2 e I-3.

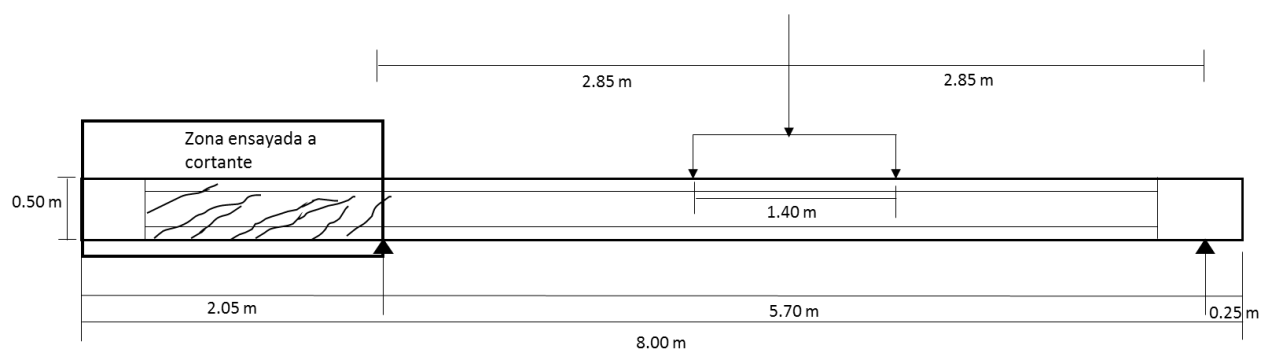


Fig. 5.12. Esquema del ensayo a flexión de la viga I-3.

5.5.3 Características de las vigas HPP

Esta etapa de aplicaciones del sistema OBR consistió en la monitorización de cuatro ensayos de laboratorio en tres vigas denominadas I1, I2 e I3 de HPP y con una longitud de 8 m cada una.

Las secciones transversales, dimensiones y la disposición de la armadura transversal, longitudinal (ambos denominados como acero pasivo), y el acero de pretensado (acero activo), se presentan en las Figs. 5.13 y 5.14 y en la Tabla 5.1.

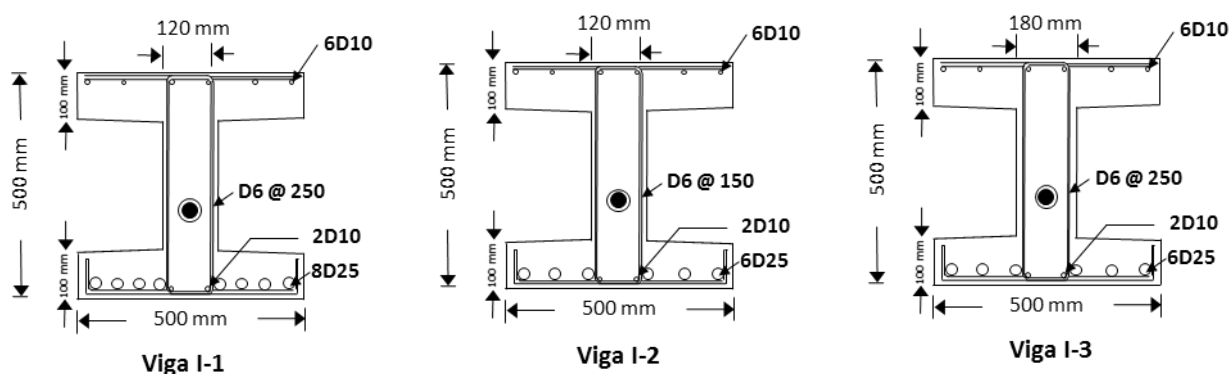


Fig. 5.13. Secciones transversales, dimensiones y detalles de las vigas de HPP.

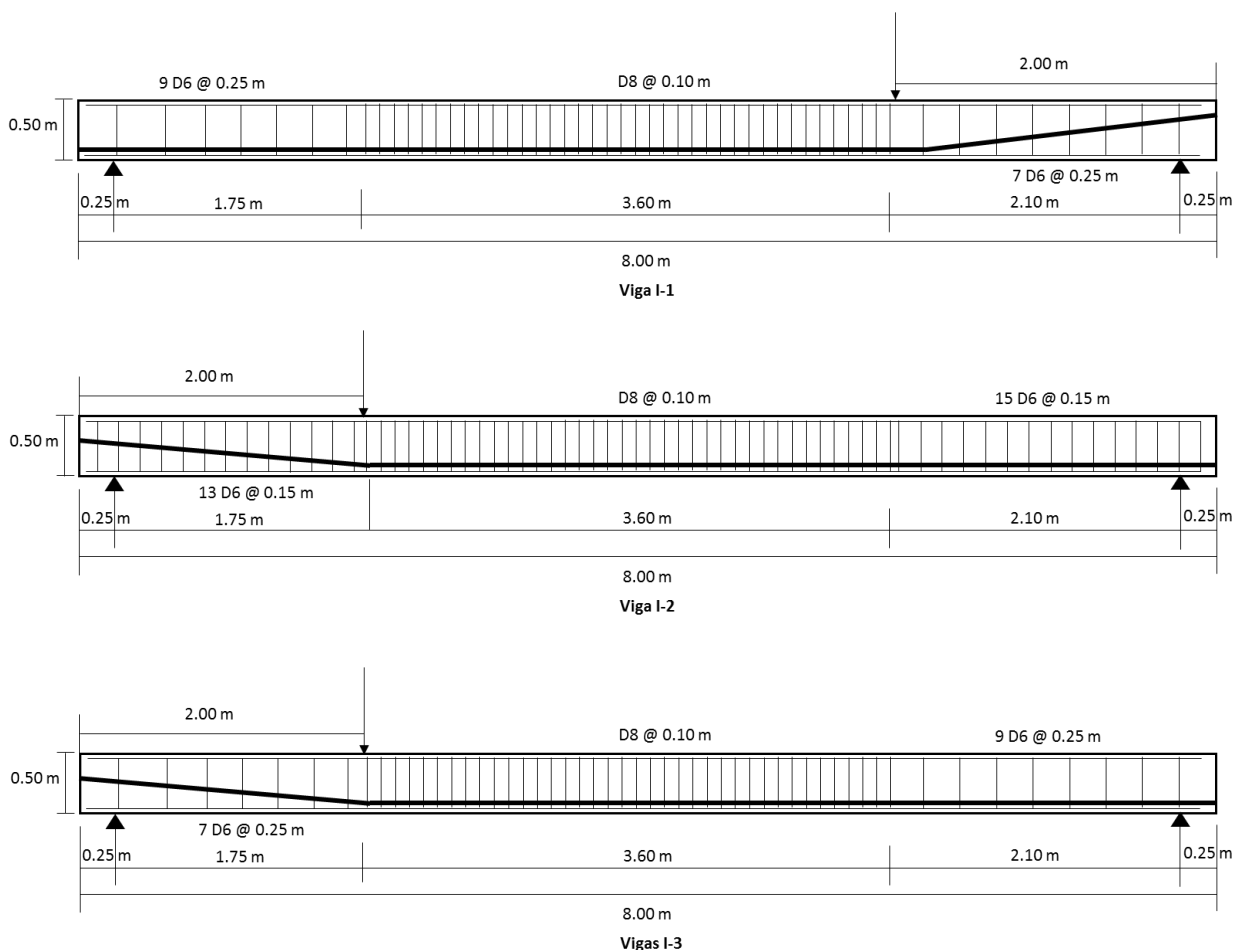


Fig. 5.14. Distribución del acero activo y pasivo, dimensiones y detalles de las vigas de HPP.

Tabla 5.1. Características principales de las vigas

Viga	Ancho del Alma (mm)	Armadura pasiva		Armadura activa			Separación de estribos (mm)
		Superior	Inferior	cordones	Área (mm ²)	σ_p (Mpa)	
I-1	120	6 D10	8 D25+2 D10	2	300	1312	250
I-2	120	6 D10	6 D25+2 D10	2	300	1312	150
I-3	180	6 D10	6 D25+2 D10	4	600	1303	250

Las propiedades mecánicas del hormigón para cada una de las vigas ensayadas se presentan en la Tabla 5.2. Estas propiedades fueron obtenidas a través de distintas probetas ensayadas experimentalmente en laboratorio (Celada, 2015).

Tabla 5.2. Propiedades mecánicas del hormigón

Especimen	f_{cm} (Mpa)	f_{ct} (Mpa)	E (Mpa)	ϵ_{fct} $\mu\epsilon$
I-1	325	4.6	36440	126
I-2	293.5	4.15	27264	152
I-3	414.6	5.86	34261	171
I-3*	379	5.36	34689	154

*Propiedades mecánicas utilizadas en el ensayo a flexión

En la última columna de esta tabla, se muestra el valor de la máxima deformación unitaria a tracción (ϵ_{fct}) para cada una de las vigas ensayadas. Estos valores de ϵ_{fct} , representan los umbrales de deformación a partir de los cuales, en el análisis de los resultados de cada ensayo, se considera que en las vigas puede dar inicio la fisuración.

5.5.4 Descripción de la instrumentación con sensores discretos

Como se mencionó en la sección 5.5.2 de este capítulo, tanto los tres ensayos a cortante como el ensayo a flexión de las vigas HPP descritas anteriormente, formaron parte de un extenso proyecto de investigación acerca del comportamiento de este tipo de elementos (Bairán, 2012, Celada, 2015). Parte de dicho proyecto fue una extensa campaña de instrumentación de las ocho vigas de HPP. Esta instrumentación consistió en colocar tanto en el acero activo como en el acero pasivo transversal y longitudinal, una serie galgas extensométricas que, posteriormente, quedaron

embebidas al ser hormigonadas cada una de las vigas. La descripción completa y detallada de esta instrumentación es parte del trabajo doctoral en proceso de Celada, 2015.

En el caso del presente trabajo de investigación, y para tener una referencia comparativa de los resultados que se obtienen con el sistema OBR, se consideran los datos que se obtuvieron durante los ensayos, en aquellas galgas embebidas en el acero pasivo colocadas en la zona de cortante. En las Figs. 5.15 a 5.17 se localizan algunas de las galgas extensométricas que se embebieron en los estribos de cada una de las vigas ensayadas. En estas figuras se indica la posición de cada una de estas galgas en los estribos y se identifican como GPIS. Los estribos se numeraron del 1 al 5, y se puede apreciar que en general se colocó más de una galga extensométrica con respecto a la altura de cada estribo (A, B, C y D). Lo anterior con la finalidad de poder obtener la variación de la deformación a lo largo de la longitud de un mismo estribo. En estas figuras también se localizan las galgas extensométricas colocadas en el refuerzo pasivo horizontal, y que se identifican como GPIL.

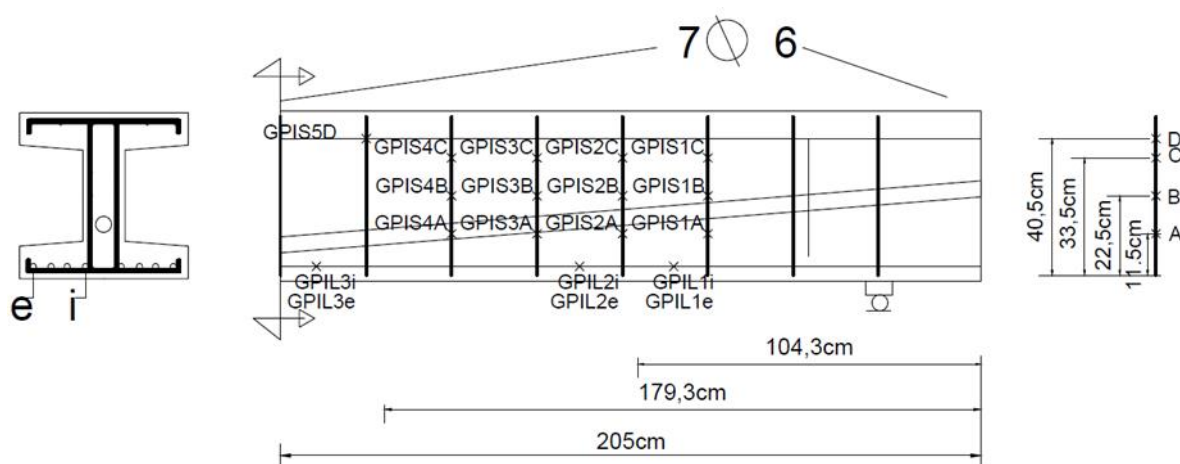


Fig. 5.15. Localización e identificación de galgas extensométricas en la viga I-1.

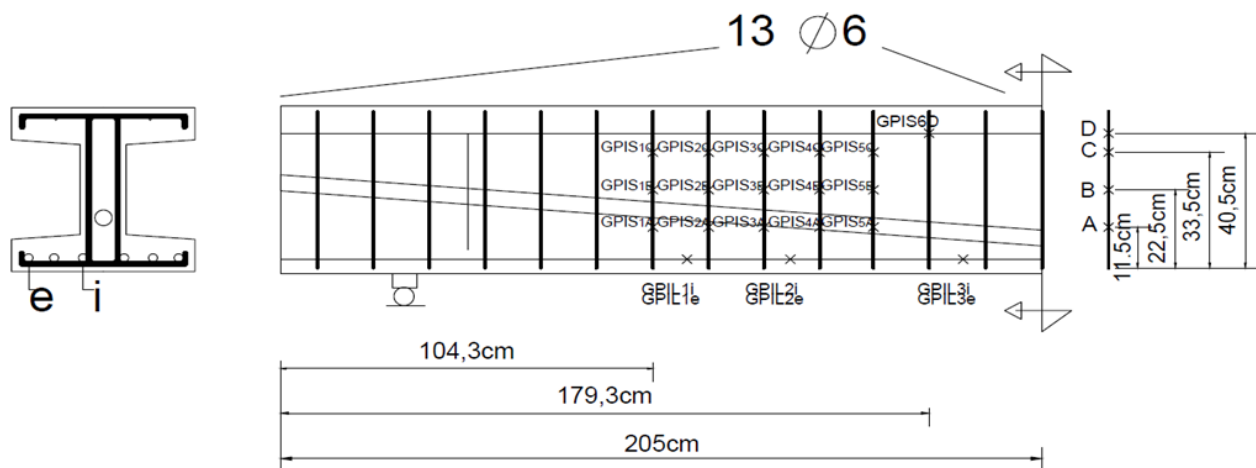


Fig. 5.16. Localización e identificación de galgas extensométricas en la viga I-2.

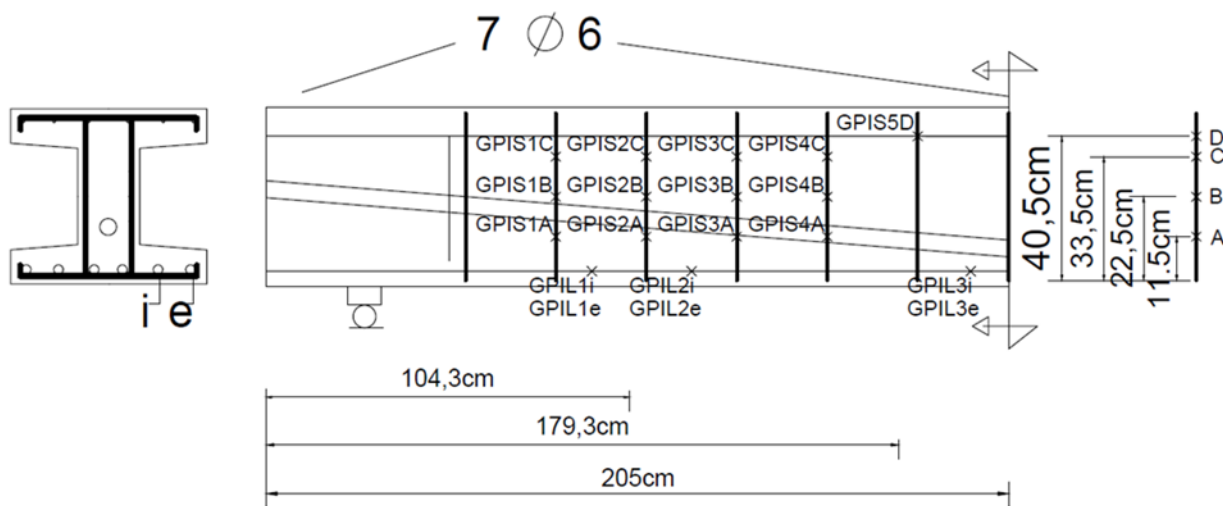


Fig. 5.17. Localización e identificación de galgas extensométricas en la viga I-3.

Posteriormente y previo a cada uno de los ensayos realizados, la instrumentación de tipo convencional se complementó con una serie de sensores externos, cuya ubicación y descripción detallada se encuentra en el trabajo doctoral en proceso de Celeda, 2015.

De esta instrumentación, y con el fin de tener una referencia en cuanto a la apertura de fisuras por flexión, se utilizó la información obtenida de los transductores magnéticos de desplazamiento colocados en forma horizontal y en la parte inferior de viga I-3, durante el ensayo correspondiente. En la Fig. 5.18 se muestra en forma esquemática la ubicación de los tres transductores utilizados, los cuales se identifican como C-2, C-4 y C.6.

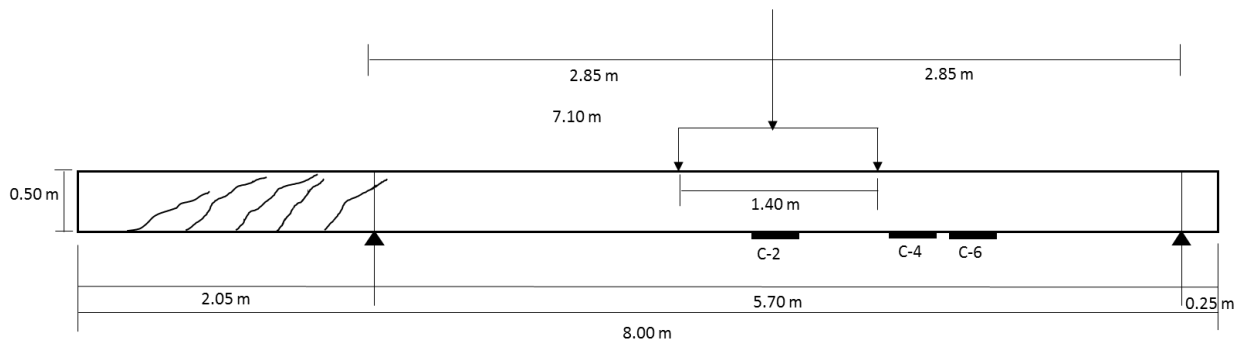
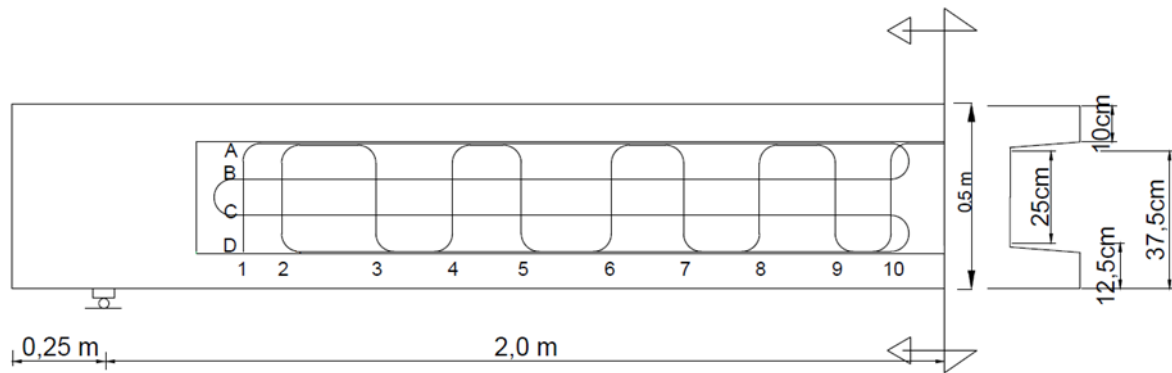


Fig. 5.17. Localización e identificación de transductores magnéticos de desplazamiento en la viga I-3.

5.5.5 Descripción de la instrumentación con SFOD

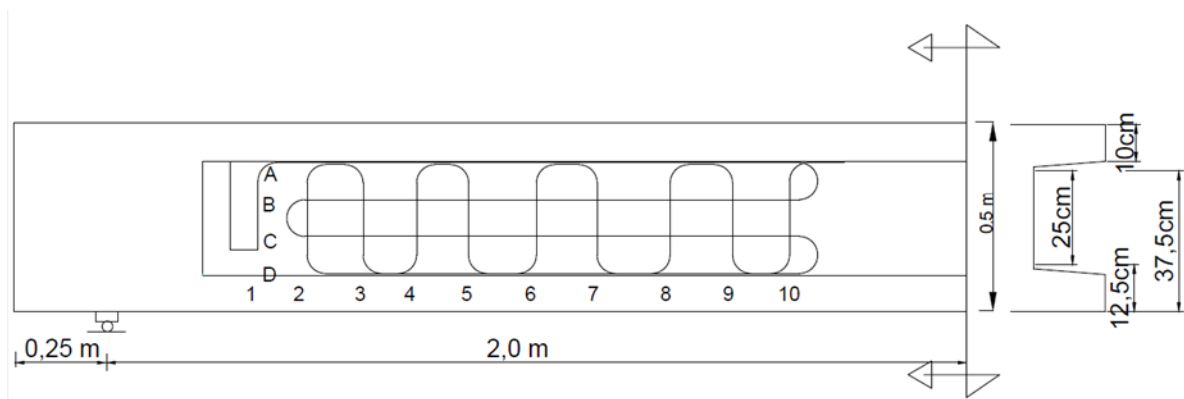
5.5.5.1 Instrumentación con SFOD para los ensayos a cortante

Para detectar y localizar las fisuras en los ensayos por cortante, en cada una de las tres vigas se propuso un arreglo de SFOD con el fin de conformar una malla 2D en la zona de cortante. Estas mallas se conformaron en el alma de cada viga con un SFOD de 10 m y otro de 5 m de longitud, en un primer caso. Posteriormente en las dos vigas restantes, la malla 2D se conformó únicamente con un SFOD de 10 m de longitud. En la Fig. 5.18 se muestra un esquema general de la propuesta de distribución de los SFOD para los ensayos a cortante, se observa que las mallas 2D se conformaron en una longitud de 2 m con respecto a uno de los apoyos y considerando una altura de la viga de 50 cm.



VI-2

Fig. 5.20 Arreglo de SFOD para el ensayo de cortante de la viga I-2.



VI-3

Fig. 5.21 Arreglo de SFOD para el ensayo de cortante de la viga I-3.

Cabe mencionar que para conformar las mallas, el cable de fibra óptica sufrió de una serie de dobleces a lo largo de toda su longitud sin afectar su buen funcionamiento. Gracias a los 25 cm del altura de las tres vigas (Figs. 5.19 a 5.21), estos dobleces tuvieron un radio de curvatura aproximado de 8 cm, superior al radio mínimo utilizado en estudios previos, en los cuales con este tipo de SFOD se han conformado bucles de hasta 1.25cm de radio (Gifford, *et al.*, 2010).

En los tres ensayos realizados a cortante, con excepción del primero (viga I-1), los arreglos de SFOD en dirección horizontal se conformaron por cuatro secciones denominadas A, B, C y D, en forma descendente como se muestra en las Figs 5.19 a 5.21. En dirección vertical, las secciones se denominaron de la 1 al 9 para el primer ensayo, y de la 1 al 10 para los ensayos de las vigas I-2 e I-3 (Figs. 5.19 a 5.21).

En las vigas I-1 e I-3 (Fig. 5.19 y Fig. 5.21), la separación de estribos en la zona ensayada a cortante fue de 25 cm, mientras que en la viga I-2 (Fig. 5.20), se tuvo una separación de estribos de 15 cm. Se menciona lo anterior, ya que con el propósito de comparar las deformaciones verticales

obtenidas con los SFOD y las galgas embebidas en los estribos, en las vigas I-2 e I-3, se intentó hacer coincidir algunas secciones verticales de los SFOD, con la presencia de los estribos.

En las Figs. 5.22 a 5.23 se muestra esquemáticamente para las vigas I-2 e I-3, la ubicación tanto de los estribos y cada una de las galgas embebidas, como la posición de las secciones verticales de los SFOD.

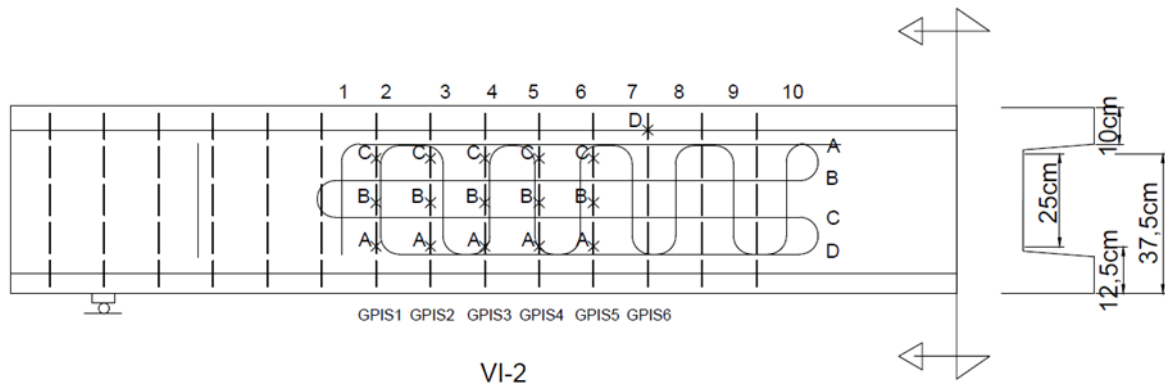


Fig. 5.22 Ubicación de galgas y secciones del SFOD1 para el ensayo de cortante de la viga I-2

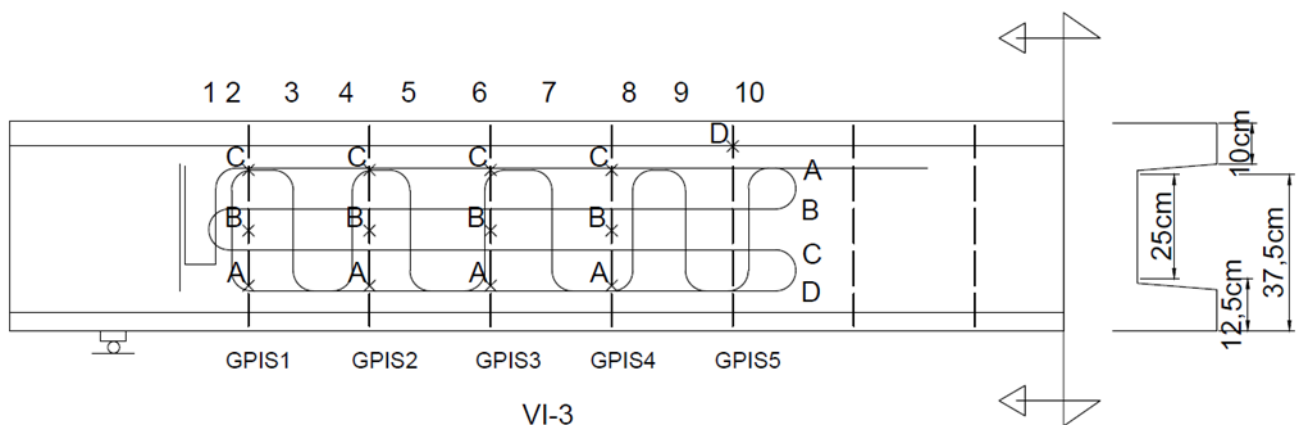


Fig. 5.23 Ubicación de galgas y secciones del SFOD1 para el ensayo de cortante de la viga I-3.

En la Fig. 5.19 se indican dos SFOD adheridos en la superficie de la viga I-1, uno colocado básicamente en dirección horizontal denominado SFOD1 con una longitud total de 10 m, y un segundo sensor denominado SFOD2 colocado en dirección vertical de 5 m de longitud. En este ensayo el SFOD1 tuvo tres secciones horizontales adicionales denominadas E, F y G (Fig. 5.19).

El primer segmento adicional denominado E, se colocó con el propósito de medir las deformaciones a lo largo de la zona de cortante del patín o ala de la viga I-1.

Adicionalmente se colocaron en forma paralela a las secciones C y B en el alma de la viga V-1, dos secciones que se denominaron F y G. Estas dos secciones adicionales fueron adheridas a la superficie de hormigón, cada una con un tipo de adhesivo diferente. Lo anterior, con el objetivo de estudiar a un nivel básico, la influencia de tipos diferentes de adhesivo en la detección de fisuras en superficies de hormigón por medio de un sistema OBR.

De esta forma, la sección F, paralela y separada aproximadamente un centímetro de la sección C, fue adherida al hormigón con cianoacrilato. Para adherir la sección G paralela a la sección B, se utilizó un adhesivo de silano modificado. También en la Fig. 5.19 se muestra en forma esquemática la distribución de estas secciones horizontales adicionales de fibra óptica.

Posteriormente, para medir y comparar en forma experimental los distintos anchos de fisura, se colocaron en el alma de cada una de las vigas ensayadas, arreglos de potenciómetros con el fin de conformar dos rosetas con las cuales medir los desplazamientos en la zona en la cual se esperaba se presentasen las fisuras por cortante de mayor ancho. En las Figs. 5.24 a 5.26 se muestran los tres diferentes arreglos conformados con SFOD y rosetas de desplazamiento para cada una de las tres vigas ensayadas a cortante.

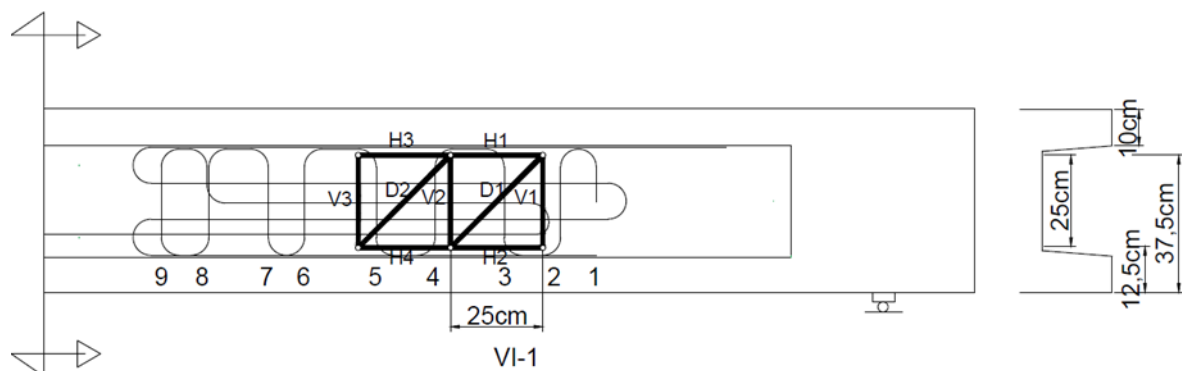


Fig. 5.24 SFOD y roseta de desplazamientos para el ensayo de cortante de la viga I-1.

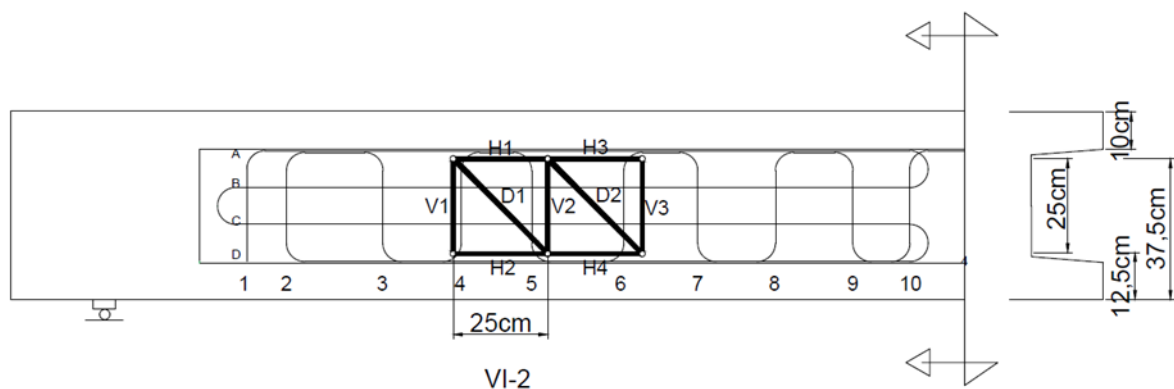


Fig. 5.25 SFOD y roseta de desplazamientos para el ensayo de cortante de la viga I-2

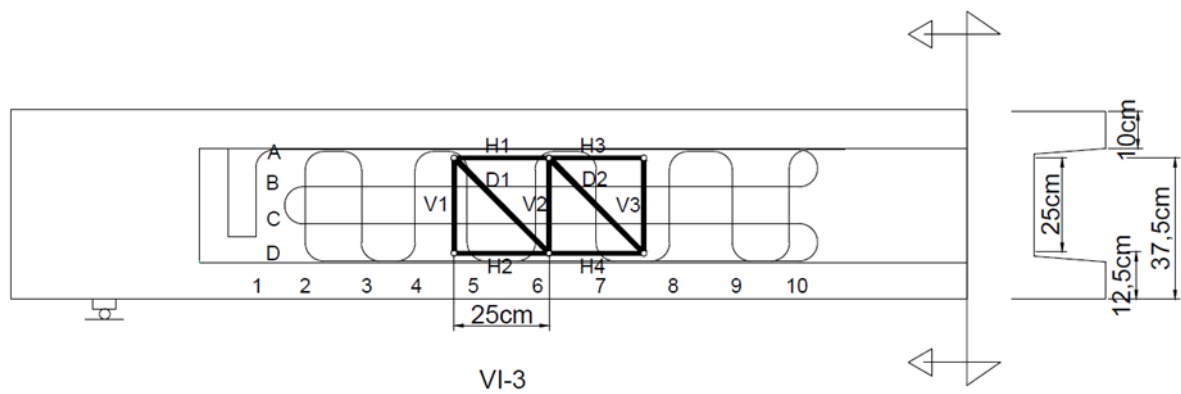


Fig. 5.26 SFOD y roseta de desplazamientos para el ensayo de cortante de la viga I-3

También en las Figs. 5.24 a 5.26 se identifican cada uno de los potenciómetros que conforman las rosetas de desplazamiento. Los potenciómetros verticales se denominan V1, V2 y V3, los horizontales superiores H1 y H3, los horizontales inferiores H2 y H4, y los diagonales D1 y D2. La separación entre los potenciómetros verticales fue aproximadamente de 25 cm, lo que implicó cubrir una región del alma de las vigas de aproximadamente 50 cm (Figs. 5.24 a 5.26).

5.5.5.2 Instrumentación con SFOD para el ensayo a flexión

Para realizar el ensayo a flexión se utilizó nuevamente la viga I-3. En la Fig. 5.27 se muestra el aspecto que guardaba esta viga antes del ensayo. Se aprecia claramente el fuerte nivel de daño concentrado en la zona de la viga que fue ensayada a cortante.



Fig. 5.27 Aspecto de la viga I-3 previo al ensayo a flexión.

En la instrumentación a flexión de la viga I-3 se utilizó un SFOD de 20 m de longitud. Con este sensor se conformaron dos tramos paralelos de medición continua en la parte superior de la viga y que se denominaron como secciones A y B respectivamente. Posteriormente, con el mismo SFOD en la parte inferior de la viga, se establecieron los tramos paralelos denominados secciones C y D. En la Fig. 5.28 se muestra en forma esquemática la conformación de los tramos de medición con el SFOD adherido a la superficie de hormigón de la viga I-3, y la ubicación de los transductores magnéticos de desplazamiento.

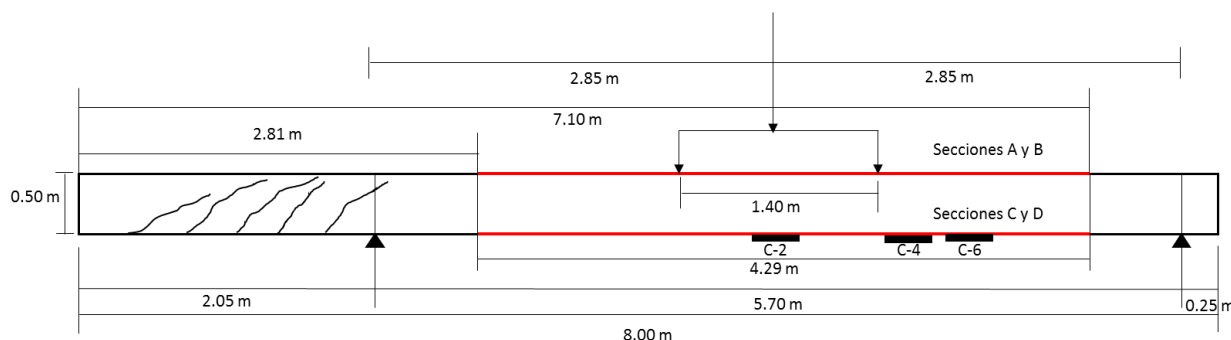


Fig. 5.28 Aspecto de la viga I-3 previo al ensayo a flexión.

5.5.6 Instalación de los SFOD

5.5.6.1 Instalación de los SFOD para los ensayos de cortante

El montaje de la fibra estuvo en función de la altura del alma y la separación de los estribos en cada una de las vigas. Para la instalación de la fibra óptica se siguieron procedimientos similares a los que establece el proveedor del sistema OBR a través de videos y notas de aplicación (www.lunainc.com). De igual manera, se tomaron en cuenta indicaciones referentes al pegado de la fibra que se obtuvieron de trabajos previos, tanto en campo como en laboratorio (Villalba y Casas, 2013, Casas, *et al.*, 2014). En las Figs. 5.29 a 5.31, se presenta parte de la instalación de la fibra en las vigas de HPP. En la Fig. 5.29 se muestra el proceso de limpieza con alcohol de la superficie de hormigón, lo anterior con el objeto de eliminar la presencia de polvo e impurezas que puedan afectar el pegado de la fibra a la superficie.

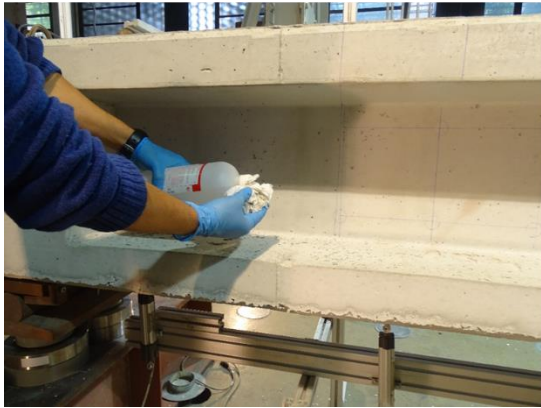


Fig. 5.29. Proceso de limpieza de la superficie de hormigón

Una vez limpia la superficie, se procede al trazo de la malla 2D con el fin de tener una guía visual en el pegado de la fibra y también establecer la manera más precisa posible un sistema de referencia. El establecer un sistema de referencia permite conocer la ubicación de cada punto de la fibra dentro de la viga ensayada. El trazo de la malla se muestra en la Fig. 5.30

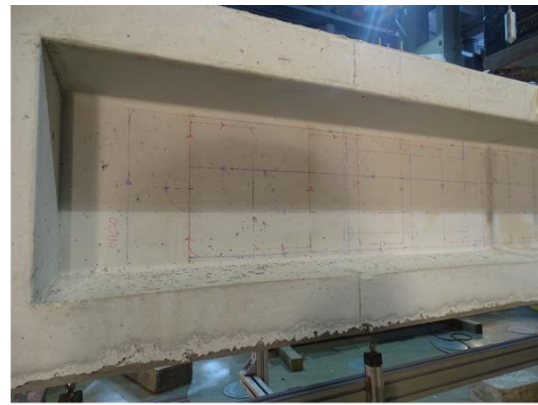


Fig. 5.30 Trazo del recorrido de la fibra para conformar una malla 2D en la zona de cortante de la viga

En la Fig. 5.31 se muestra el montaje de la fibra en la zona de cortante de la viga. Un primer paso consistió en la presentación de la fibra en la zona de cortante (parte izquierda de la Fig. 5.31). Este paso se realizó sin el uso del adhesivo, únicamente estirando la fibra sobre la superficie de hormigón y usando pequeñas etiquetas adhesivas para mantener la fibra en su posición. Una vez concluida la presentación de la fibra, se procedió a pegarla con adhesivo de uso comercial (Fig. 5.31 derecha).

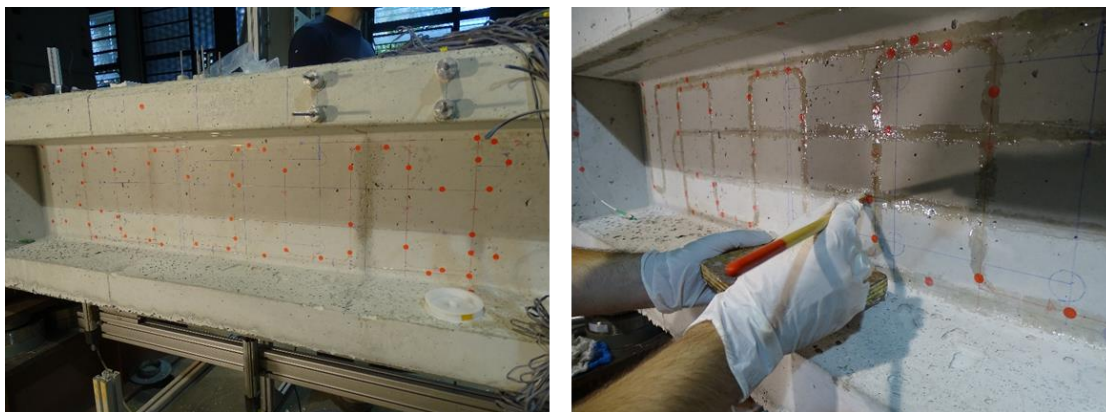


Fig. 5.31 Presentación y pegado de la fibra óptica al alma de la viga de hormigón.

Por último, en la Fig 5.32, en la parte izquierda se muestra el aspecto final de la fibra óptica en la viga de HPP, y en la parte derecha la misma fibra, pero con la correspondiente roseta de desplazamientos instalada en la zona de cortante.



Fig. 5.32 Vistas de la fibra óptica instalada

En las tres vigas ensayadas, se siguió el mismo procedimiento. En las Figuras 5.33 a 5.35, se muestran algunas vistas generales del aspecto de las vigas ensayadas antes de la realización de cada ensayo.

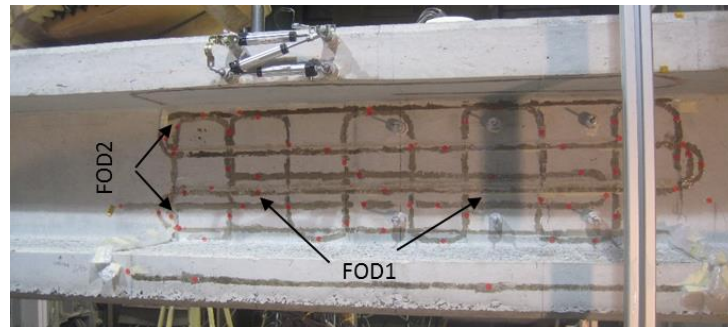


Fig. 5.33 Vista de la malla 2D del SFOD en la viga I-1.

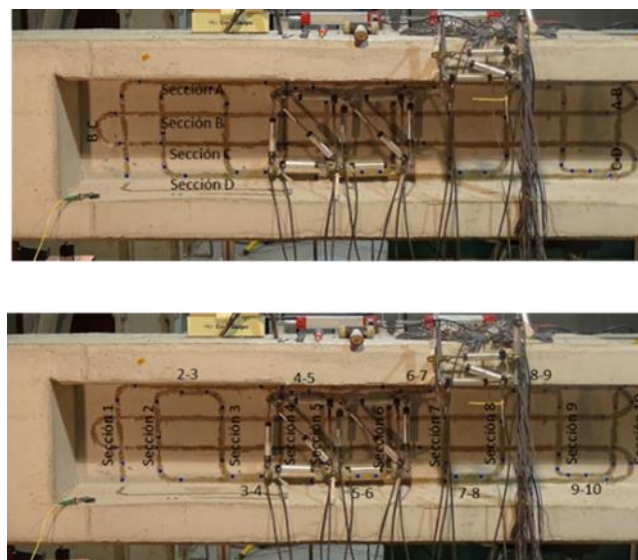


Fig. 5.34 Vista de la malla 2D del SFOD en la viga I-2

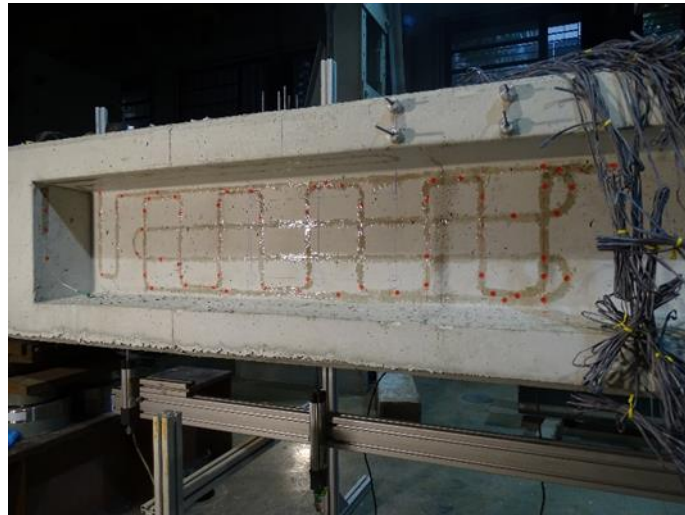


Fig. 5.35 Vista de la malla 2D del SFOD en la viga I-3.

5.5.6.2 Instalación del SFOD para el ensayo a flexión

La instalación del SFOD en la superficie de la viga I-3 para el ensayo a flexión se realizó con el propósito de detectar las fisuras ya existentes en la parte inferior de la viga (secciones C y D), medir su progresión, y simultáneamente detectar la aparición de nuevas fisuras. En forma complementaria, a través de las dos secciones de fibra distribuida en la parte superior de la viga (secciones A y B), se intentó poder medir las deformaciones de compresión.

El SFOD de 20 m se montó en cuatro secciones de una longitud aproximada de 4.30 m, con el fin de poder detectar, localizar y cuantificar las fisuras por flexión, sobre todo en la zona central de la viga. El procedimiento de montaje y pegado de la fibra, fue similar al que se siguió durante los ensayos de cortante. El pegado de las cuatro secciones de fibra adheridas al hormigón, nuevamente se hizo con un adhesivo epoxi. En la Fig. 5.36 se observan aspectos generales del SFOD adherido en la parte superior e inferior de la viga I-3 durante el ensayo a flexión.

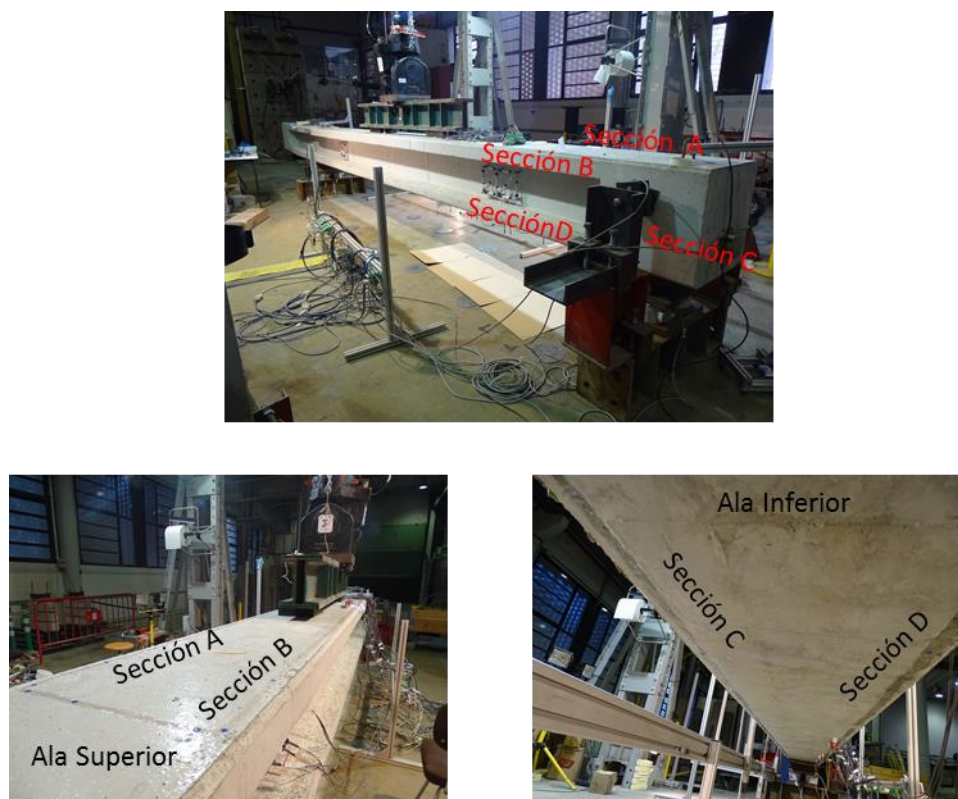


Fig. 5.36 Vista del SFOD en la viga I-3 durante el ensayo a flexión.

En la Fig. 5.37 se pueden apreciar algunos de los daños que presentaba la viga I-3 producidos por el ensayo a cortante en la zona que posteriormente se sometería al ensayo a flexión. Estos daños se localizaban en la zona de la viga que fue instrumentada con el SFOD para el ensayo a flexión y, como se verá más adelante, tuvieron una influencia significativa en los valores de deformación medidos

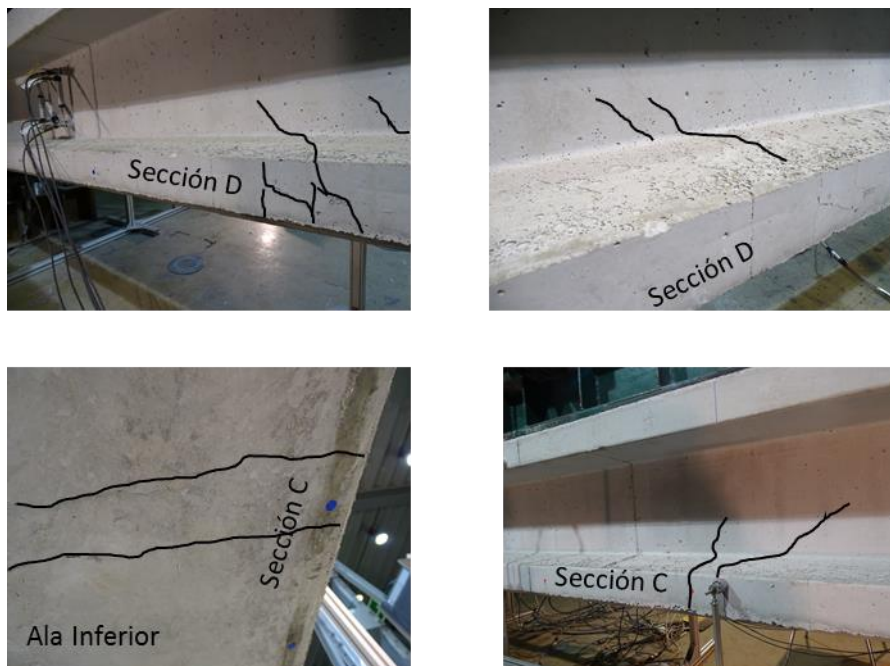


Fig. 5.37 Fisuras en la viga I-3 previas al ensayo a flexión.

5.5.6.3 Marco de referencia

Una vez instalada la fibra óptica en la zona de cortante y flexión, para cada viga y antes de cada ensayo, se estableció un marco de referencia con el objetivo de poder identificar y localizar la aparición y la progresión del daño con la mayor precisión posible. Por lo anterior y como se mencionó en la sección 5.4, una primer paso en la aplicación del método OBR es establecer un marco de referencia. De esta forma, en cada viga se estableció un plano cartesiano X-Y, cuyas coordenadas (0,0) representa el origen del sistema de referencia para cada viga ensayada.

En la Fig. 5.38 se muestra esquemáticamente, el sistema de referencia de la fibra óptica denominada SFOD1 en el ensayo de la viga I-1. En la parte superior de la Fig. 5.38 se indica el inicio del SFOD1 adherido a la superficie de hormigón, el cual tiene de una longitud total de 10 m. En el caso de la viga I-1, esta longitud da inicio en el conector de la fibra, el cual se colocó en la parte superior derecha de la viga a partir de los 0.38 m de longitud de la fibra. En la misma Fig. 5.38 y también en la parte superior, se indica con flechas el sentido que se siguió en el montaje y pegado del SFOD1 en la superficie de hormigón.

Una vez que el SFOD1 estuvo adherido a la superficie de hormigón, se estableció el sistema de referencia X-Y en 2D. Para ello se fijó como origen de este sistema el vértice inferior más próximo al apoyo en la zona de cortante en cada viga. En la parte inferior de la Fig. 5.38 se muestra SFOD1

adherido a la zona de cortante de la viga I-1. De esta forma se pudo asignar a cada punto de la longitud del SFOD1, una coordenada (x, y) cada cm, que como se mencionó anteriormente, fue la resolución espacial que se utilizó durante los ensayos.

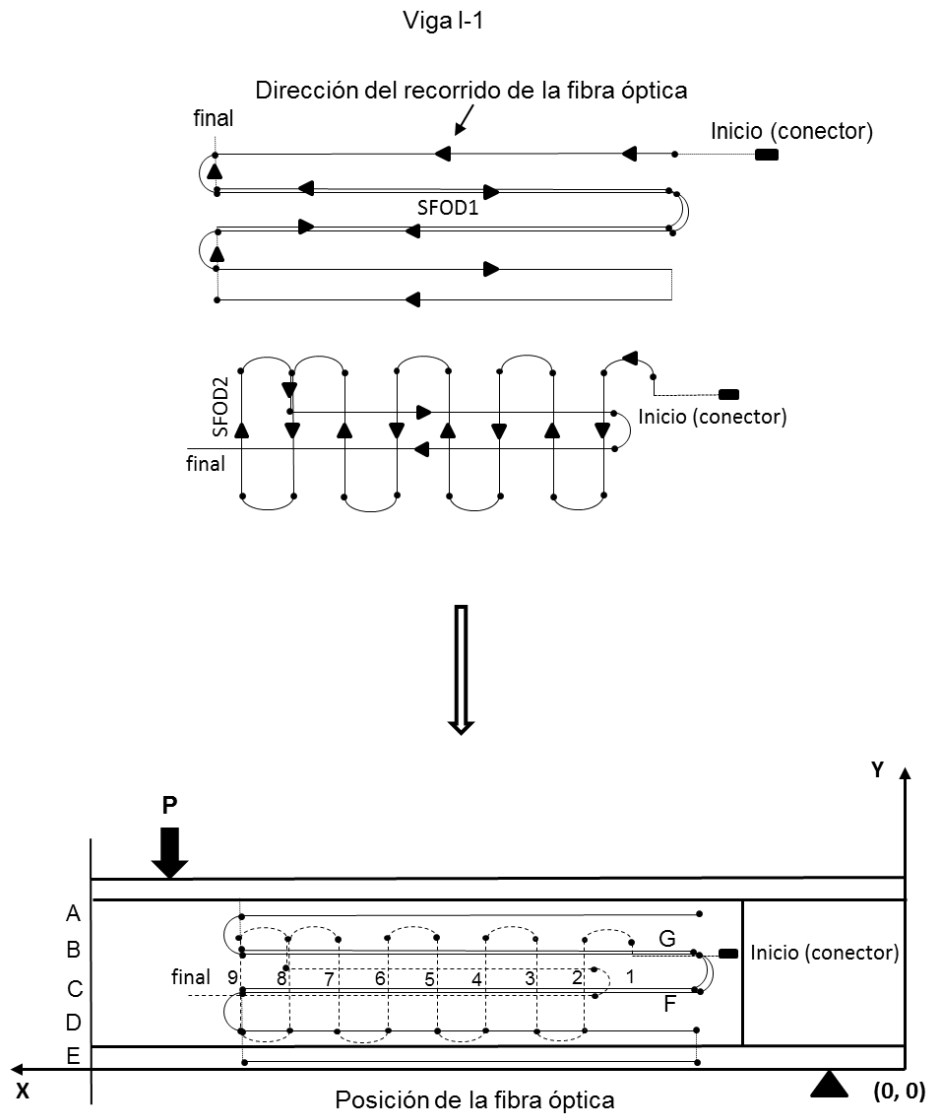


Fig. 5.38 Posición SFOD1 en la viga I-1.

En la parte intermedia de la misma Fig. 5.38, se indica el inicio y el sentido del recorrido de montaje y pegado del SFOD2, el cual tenía una longitud total de 5 m. Por último en la parte baja de esta misma figura, se muestra la configuración final de la malla 2D conformada en este caso por dos SFOD.

De igual forma, para las vigas I-2 e I-3 se muestra en la parte superior de las Figs. 5.39 y 5.40, las longitudes originales de cada fibra y el sentido del recorrido con respecto a su inicio. En la parte inferior de las mismas figuras, se establece para cada viga, el sistema de referencia y el origen del mismo, respecto a la posición en la que fue aplicada la carga en cada ensayo.

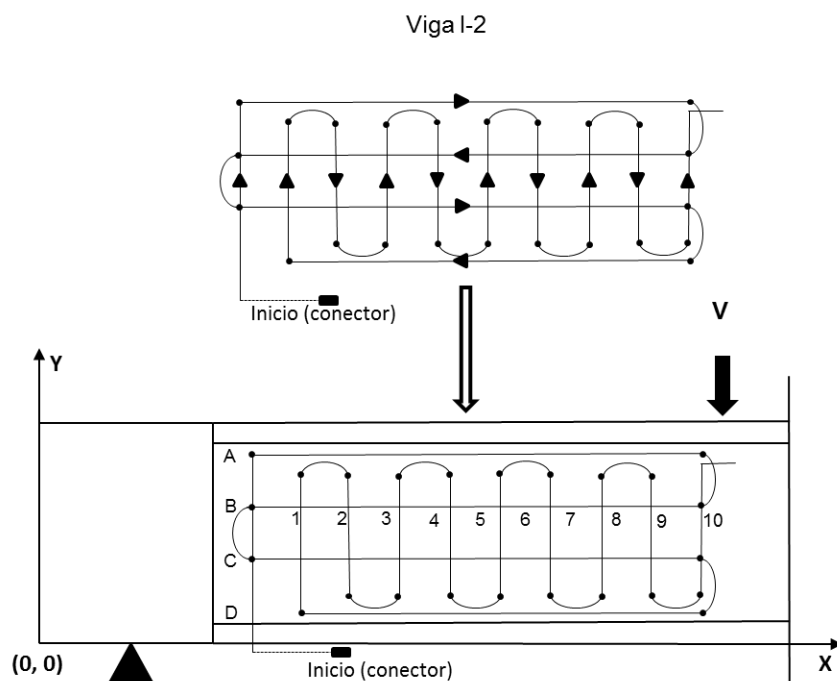


Fig. 5.39 Posición SFOD en la viga I-2

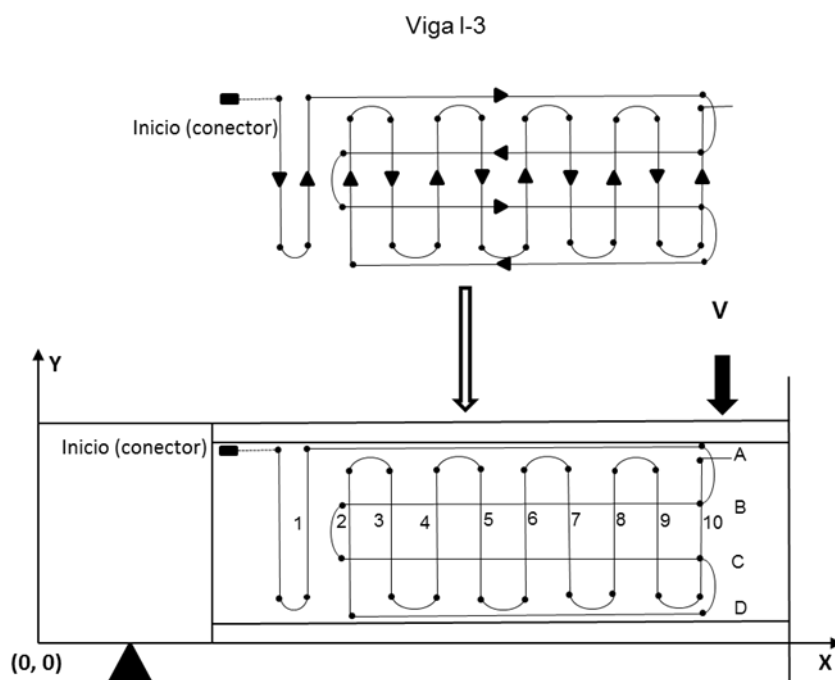


Fig. 5.40 Posición SFOD en la viga I-3.

5.6 El sistema de medición OBR

Para llevar a cabo todas las pruebas experimentales que conforman esta investigación doctoral, se utilizó un sistema de medición opto-electrónico OBR de la marca LUNA modelo ODiSI-A50. Los principios básicos de funcionamiento de este sistema se han descrito en los capítulos 1 y 2 de este trabajo. El sistema OBR es una tecnología de medición prometedora en el campo de la MSE, ya que ofrece la posibilidad de un seguimiento continuo de la deformación o la temperatura a través del largo de un cable de fibra óptica denominado SFOD.

En forma general, el ODiSI-A50 se basa en el barrido por interferometría de la longitud de onda de un haz de luz que viaja a través de un SFOD. Este sistema de medición es capaz de dividir e interrogar al SFOD en un centenar de puntos. Esto implica disponer de una adquisición de datos de forma continua a lo largo de todo el SFOD. Posteriormente, al tener la posibilidad de realizar una medición continua en una determinada longitud, la cual puede llegar a ser de decenas de metros, y con una resolución de centímetros o incluso milimétrica, esta técnica de medición resulta una herramienta de gran utilidad para la obtención de las deformaciones o las variaciones de temperatura en una estructura que requiera ser monitorizada.

El sistema de medición OBR consta de los siguientes componentes:

- Sistema opto-electrónico de medición ODiSI-A50
- Multiplexador de SFOD con capacidad para 8 canales
- Cable óptico de conexión entre el ODiSI-A50 y el SFOD
- SFOD o cables de fibra óptica con terminal FC/APC de 5, 10 y 20 m de longitud.
- Ordenador portátil

El número reducido de los componentes del sistema de medición OBR, se traduce en una fácil y rápida instalación, lo cual convierte a este sistema en una herramienta muy práctica para la monitorización de estructuras en campo y laboratorio.

Respecto al posicionamiento del sistema OBR durante un proceso de monitorización, el mayor cuidado que se requiere es en la instalación de los SFOD. Al ser cables de fibra óptica con una capa de protección mínima, resultan sumamente frágiles y muy sensibles a la rotura en caso de sufrir algún tipo de torcedura durante su instalación. En las Figs. 5.41y 5.42 se muestran los componentes del sistema OBR.

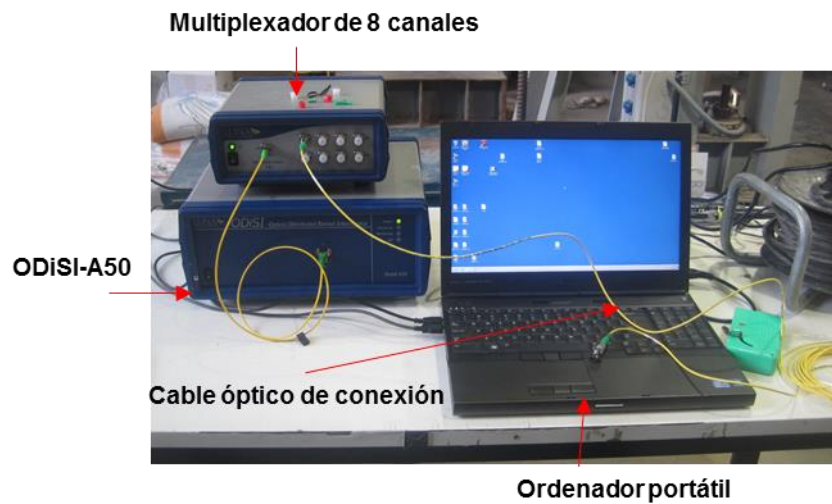


Fig. 5.41 Componentes del sistema OBR

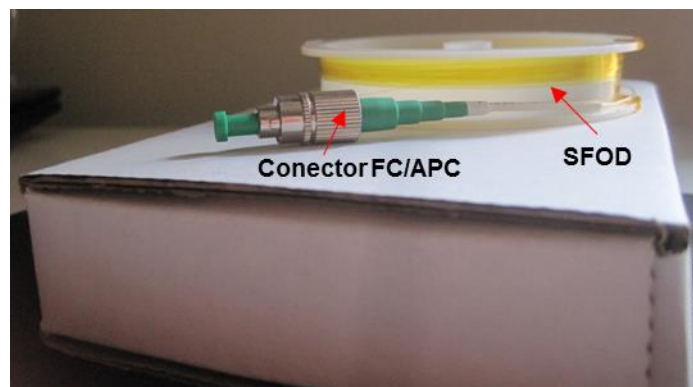


Fig. 5.42 SFOD con recubrimiento mínimo

En la Tabla 5.3 se describen las principales especificaciones técnicas del sistema opto-electrónico de medición ODiSI-A50.

Tabla 5.3 Características del sistema opto-electrónico ODiSI-A50

Parámetro	Especificación
Máxima Longitud de SFOD	50 m
Mínima Longitud de SFOD	0.5 mm
Velocidad de adquisición	2.5 Hz
Deformaciones	(+/-) 15000 $\mu\epsilon$
Temperatura	(-50 a 300 ° C)
Dimensiones	(36 x 32 x 17 cm)

CAPÍTULO 6

APLICACIÓN DEL SISTEMA OBR EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN PARCIALMENTE PRETENSADO (HPP) SUJETOS A CORTANTE Y FLEXIÓN

6.1 Introducción

Este capítulo describe los resultados de los ensayos llevados a cabo para la verificación de la monitorización mediante SFOD de un comportamiento estructural de mayor complejidad como es la respuesta a cortante en vigas de hormigón. En forma complementaria, también se estudia el caso de una viga de hormigón sujeta a flexión, que fue ensayada previamente a cortante, y que por tal motivo presentaba cierto nivel de daño al momento del ensayo a flexión.

Esta parte de la tesis doctoral se conformó a través de pruebas de laboratorio en tres vigas de HPP de 8 m de longitud, descritas en el capítulo 5. Las tres vigas ensayadas, primeramente se instrumentaron con sensores discretos (Bairán, *et al.*, 2014, Celada, 2015). De forma complementaria a dicha instrumentación, con el fin de monitorizar en forma continua la distribución de las deformaciones durante los ensayos, se utilizó un SFOD adherido a la superficie de hormigón de cada una de las tres vigas. Dos de estas vigas fueron ensayadas a cortante, y una tercera viga fue ensayada primero a cortante y posteriormente a flexión.

En el caso de las vigas sujetas a esfuerzo cortante, se propuso un método de cálculo de ancho de fisura basado en la información experimental que se obtuvo por medio de un sistema de medición con SFOD de acuerdo con la metodología descrita en el capítulo 5. Esta metodología incluye la detección y localización de fisuras, y el trazo de los patrones de fisuración por cortante en función del nivel de carga. Por último y como parte de esta metodología, en el presente capítulo, se comprueba la validez de la propuesta para el cálculo de ancho de fisura por cortante.

En este estudio, las vigas ensayadas a cortante estuvieron sujetas a una serie de ciclos de carga y descarga. Debido a ciertas limitaciones que se presentaron en el funcionamiento de los SFOD a niveles de deformación superiores a las 10,000 $\mu\epsilon$ y que se describen más en el desarrollo de este capítulo, la aplicación del método para el cálculo del ancho de fisura por cortante, se ha limitado

a niveles de carga y deformación dentro de la rama ascendente del primer ciclo de carga en cada una de las vigas ensayadas.

Para el caso de la viga con daño ensayada a flexión, se evaluó el funcionamiento de un SFOD en la monitorización de un elemento de hormigón que presentaba daño. Posteriormente se aplicó el método del cálculo del ancho de fisura para elementos de hormigón sujetos a flexión establecido en el capítulo 4, con el fin de corroborar una vez más su aplicabilidad para la obtención de anchos de fisura en forma experimental.

6.2 Resultados de tres ensayos a cortante en vigas de HPP

6.2.1 Comportamiento del sistema OBR y los SFOD durante los ensayos

En primer lugar, se evalúa el comportamiento de cada uno de los SFOD utilizados a lo largo de cada ensayo. Para ello, se registraron las deformaciones producidas en las vigas bajo una fuerza estática, aplicada en forma gradual, en seis ciclos de carga y descarga. La fuerza aplicada fue controlada por desplazamiento de 1 y 2 mm/min, hasta llegar a la rotura de la viga por cortante.

Posteriormente, se analiza la sensibilidad del sistema OBR y los SFOD para lograr la detección del inicio de fisuración en las vigas de HPP. De manera similar, en los tres ensayos, los SFOD prácticamente resistieron toda la duración del ensayo. Sin embargo y prácticamente al final de los mismos, se presenta la rotura del SFOD. Lo anterior implicó que en ningún caso se pudiera registrar la parte correspondiente a la rotura de la viga. En las Figuras 6.1 a 6.3, se muestra toda la historia de carga durante los ensayos, y se indica el momento en el cual la fibra deja de registrar deformaciones.

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, en el ensayo de la viga I-1 se utilizó una malla 2D conformada por un SFOD1 y un SFOD2 colocados en dirección horizontal y vertical respectivamente. Durante este ensayo se intentó obtener información de ambos sensores en forma secuencial, sin embargo se presentaron problemas en la captura. Lo anterior, provocó poder registrar la información de ambos sensores, únicamente en los ciclos de carga y descarga que se indican en la Fig. 6.1. Posteriormente en los ensayos de las vigas I-2 e I-3, se obtuvieron registros completos, debido a que las mallas 2D en estos ensayos, se conformaron solamente con un SFOD.

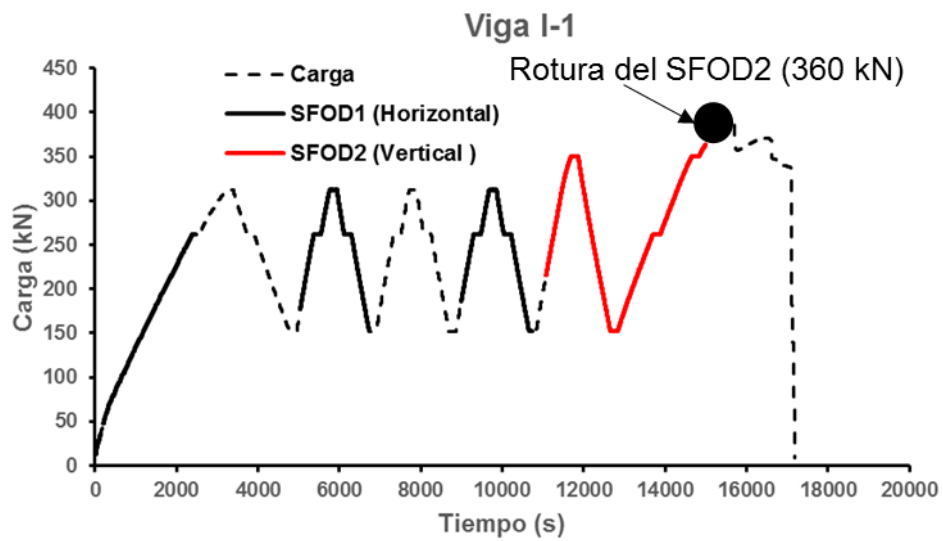


Fig. 6.1 Historia de carga del ensayo de la viga I-1, registros con los SFOD y rotura de la fibra.

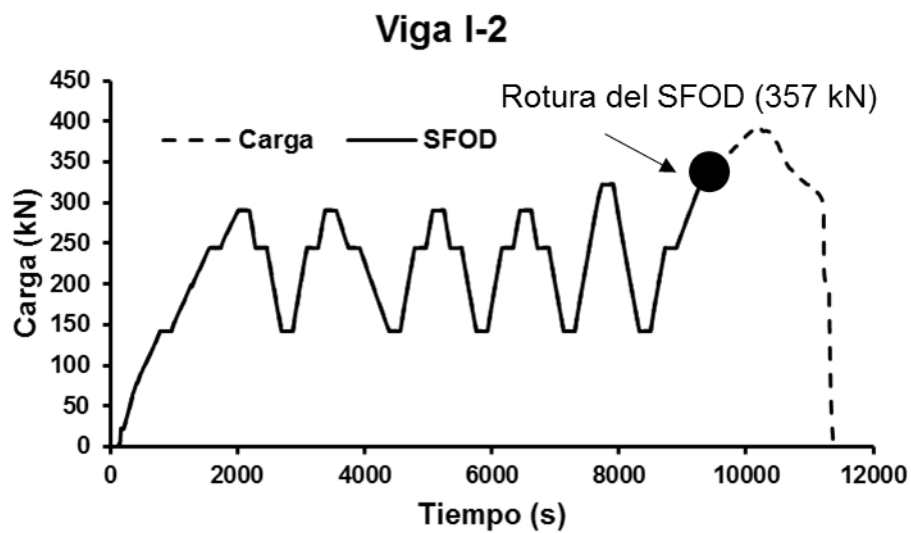


Fig. 6.2 Historia de carga del ensayo de la viga I-2, registro con el SFOD y rotura de la fibra

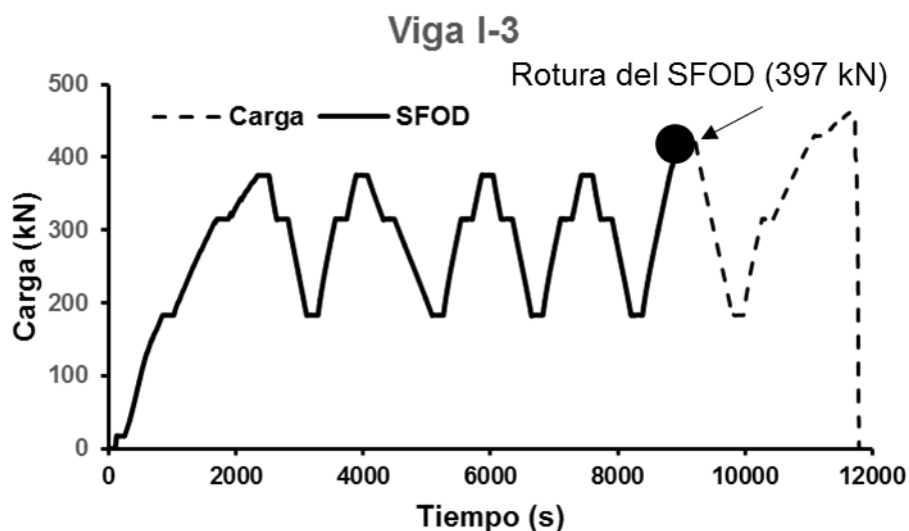


Fig. 6.3 Historia de carga del ensayo de la viga I-3, registro con el SFOD y rotura de la fibra.

En estas figuras también se indica el nivel de carga al cual la fibra se rompió en cada uno de los ensayos. En el caso del primer ensayo, el SFOD falló aproximadamente a los 360 kN, en el segundo a 357 kN, y en el tercero a 392 kN, en todos los casos después de casi cumplir los seis ciclos de carga establecidos para estos ensayos.

6.2.2 Resultados. Comportamiento del sistema OBR previo a la fisuración de las vigas HPP

Se presentan los resultados experimentales obtenidos de la aplicación del SFOD en los tres ensayos a cortante. Con los SFOD, se busca monitorizar las deformaciones producidas en las vigas HPP de sección I, bajo el efecto de una fuerza cortante aplicada en forma gradual con ciclos de carga y descarga, hasta generar la rotura por cortante de las vigas.

A través del análisis de los registros del sistema OBR, es posible obtener la distribución de las deformaciones producidas en la sección instrumentada con SFOD por la fuerza cortante aplicada en cada viga. Lo anterior, se realiza con capturas de registros de variación de la deformación a cada 1 y 5s, y una resolución espacial en el sistema OBR de 1 cm, misma que fue utilizada en el caso de la losa de hormigón descrito en el capítulo cuatro.

6.2.2.1 Viga I-1

En la Fig. 6.4 se puede observar la distribución de las deformaciones registradas con el sistema OBR en la zona instrumentada a cortante en la viga I-1. Debido al bajo nivel de carga aplicado, las deformaciones en todos los puntos son inferiores al umbral de fisuración establecido para esta viga de acuerdo a la última columna de la derecha de la Tabla 5.2 del capítulo 5. En consecuencia, no aparece todavía ninguna fisuración.

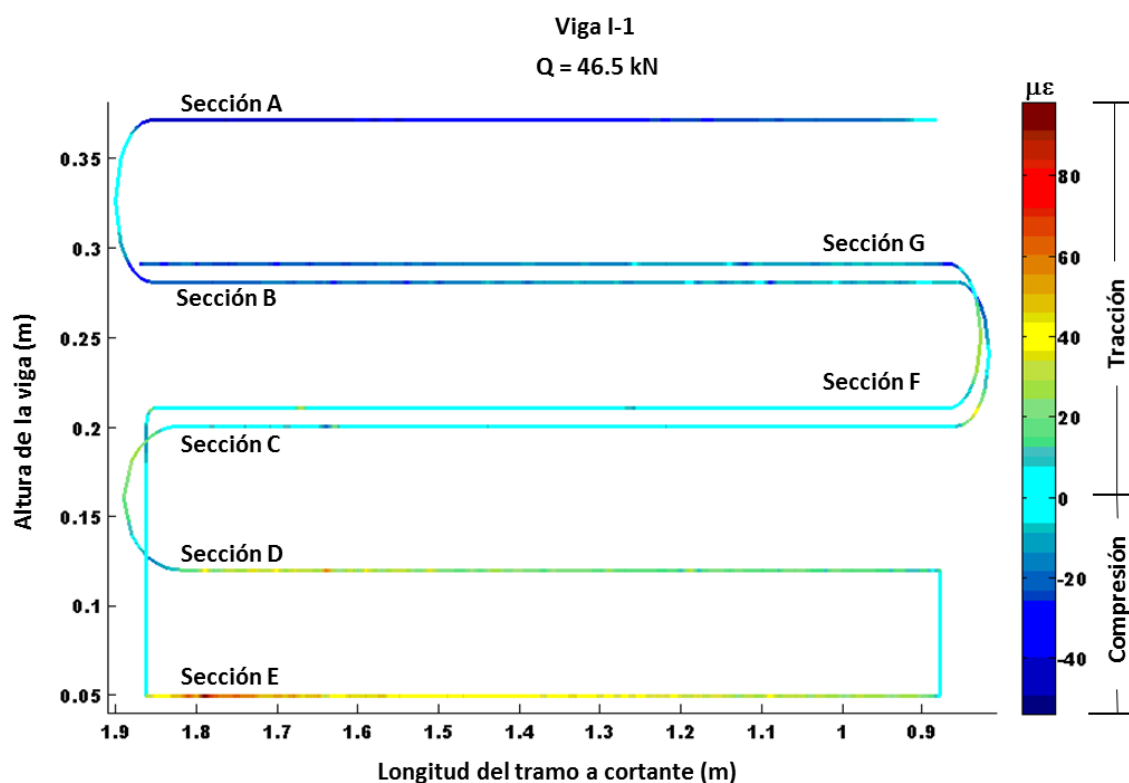


Fig. 6.4 Distribución de deformaciones en el SFOD1 de la viga I-1 con $Q = 46.5$ kN.

En las Fig. 6.4 se puede apreciar como en las secciones A, B y G del SFOD1 de la viga I-1, se presentan deformaciones promedio de compresión ligeramente superiores a las -40 $\mu\epsilon$. En las secciones C y F las deformaciones promedio son próximas a valores de 0 $\mu\epsilon$, lo cual indica la cercanía de estas secciones con respecto a la posición del eje neutro de la sección de la viga I-1 a un nivel de carga de 46.5 kN. Lo anterior coincide prácticamente con el centro de gravedad de la sección, ya que el comportamiento de la sección se mantiene en el rango elástico.

Respecto a la sección D (Fig. 6.4), la cual se encuentra en la parte inferior del alma de la viga I-1, se observan prácticamente en toda la longitud del SFOD1 valores de tracción ligeramente inferiores a las $40 \mu\epsilon$. Sin embargo, en la zona de la sección E, entre los 1.7 y 1.8 m respecto al sistema de referencia y a la posición de la carga que se establecieron como se describió anteriormente en la Fig. 5.38 del capítulo 5, aparecen deformaciones de tracción cercanas a las $80 \mu\epsilon$, lo cual permite intuir una posible aparición de una fisura en la zona indicada cuando la viga se encuentre sujeta a un nivel de carga superior.

6.2.2.2 Viga I-2

En la Fig. 6.5, se muestra la distribución de deformación en la viga I-2 para una nivel de carga de 47 kN, igual al de la viga I-1. Se aprecia que de manera muy similar al caso de la viga I-1, las sección A y B del SFOD, presenta compresiones entre las -40 y $-80 \mu\epsilon$. También se puede observar que las secciones C y D, se encuentran básicamente sujetas a tracción. Las tracciones en la sección C son muy próximas a las $0 \mu\epsilon$, debido a su cercanía con el eje neutro de la sección. En la sección D las tracciones presentan valores que oscilan entre las 40 y las $60 \mu\epsilon$, inferiores todavía a la deformación de fisuración por tracción.

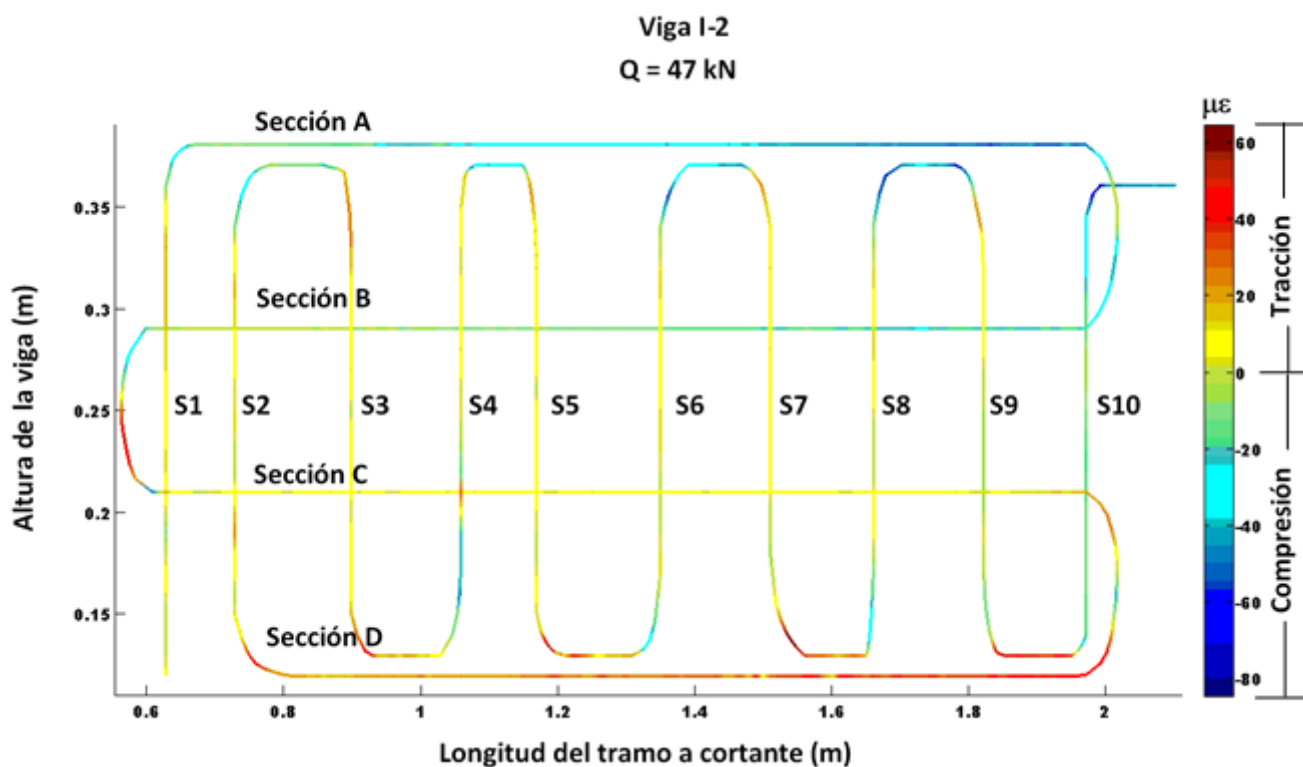


Fig. 6.5 Distribución de deformaciones en el SFOD de la viga I-2 con $Q = 47$ kN.

6.2.2. 3 Viga I-3

En la Fig. 6.6, para la viga I-3, también se muestra la distribución de las deformaciones para un nivel de carga de 47 kN. En este caso y en forma general, las secciones B, C y D del SFOD, presentan tracciones que oscilan entre las 10 y 40 $\mu\epsilon$. La sección B aunque presenta valores de tracción, éstos son muy próximos a las 0 $\mu\epsilon$, lo cual indica su cercanía con la posición del eje neutro de la viga para el nivel de carga indicado. En la Fig. 6.6 también se puede apreciar que la única zona de la viga I-3 que presenta compresiones, es la sección A del SFOD. En este caso las compresiones presentan valores entre las -20 y -40 $\mu\epsilon$.

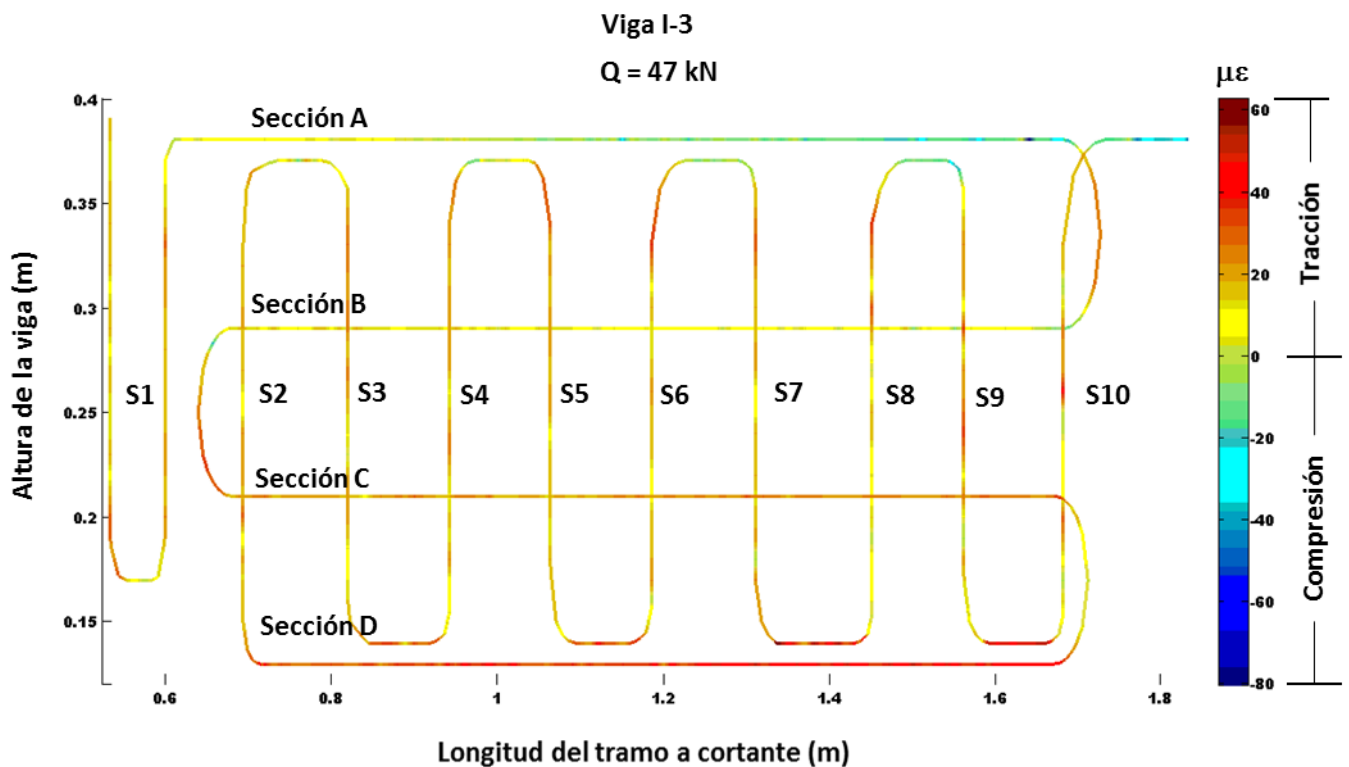


Fig. 6.6 Distribución de deformaciones en el SFOD de la viga I-3 con $Q = 47$ kN.

6.2.3 Detección y localización de fisuración por medio de los SFOD.

En los análisis posteriores de la distribución de deformaciones, se detecta y localiza una primera fisura dentro de las zonas instrumentadas con SFOD en cada una de las vigas ensayadas. Para cada uno de los ensayos, en las Figs. 6.7 a 6.9 se muestra la evolución de las deformaciones en el alma de la viga.

A partir del análisis de la evolución de las deformaciones, se procede a identificar el inicio de la presencia de daño en la zona instrumentada con SFOD en cada una de las vigas. Esta identificación se establece a partir de un umbral de daño definido por la deformación unitaria asociada a la resistencia a tracción del hormigón de cada viga (Tabla 5.2 capítulo 5).

En la Fig. 6.7 se muestra la detección y localización de una primera fisura en la región instrumentada con el SFOD1 de la viga I-1. Esta fisura se encuentra en la parte de la sección E entre el los 1.7 y 1.8 m, que se había descrito en la Fig.6.4. En este caso, los valores de deformación a tracción que se presentan, son mayores a las $126 \mu\epsilon$ y corresponden al umbral de daño definido para la viga I-1.

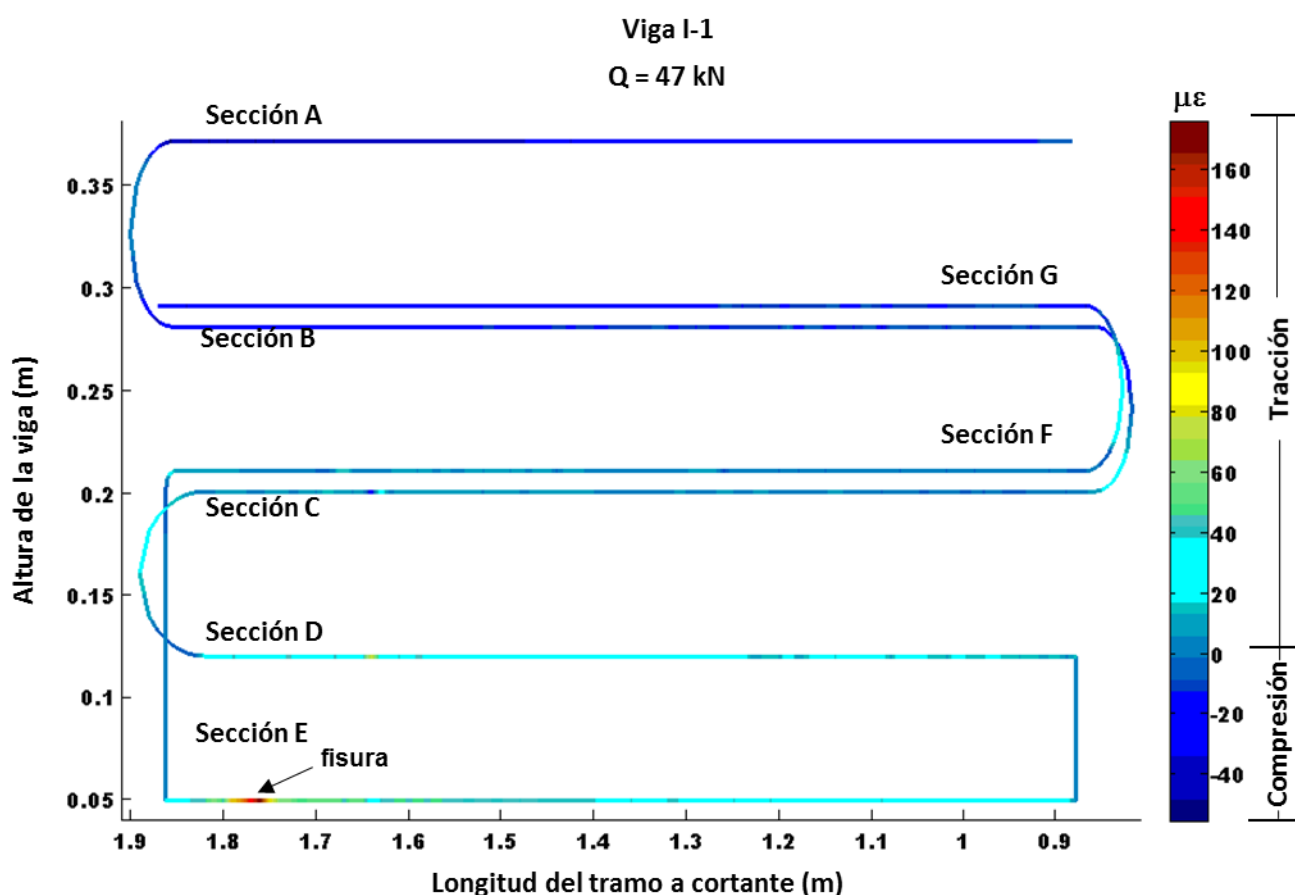


Fig. 6.7 Distribución de deformaciones en el SFOD1 de la viga I-1 con $Q = 47 \text{ kN}$.

Para el caso de la viga I-2, en la Fig. 6.8 se muestra el caso de la distribución de deformaciones para un nivel de carga de 67 kN. Se observa que en la sección D en una posición cercana a los 2 m con relación al sistema de referencia establecido, se presentan deformaciones a tracción con valores que oscilan entre las 150 y las 200 $\mu\epsilon$. Estos valores de deformación son mayores que el umbral de deformación establecido por la deformación a tracción ϵ_{fct} que en este caso y de acuerdo a la Tabla 5.2 es de 152 $\mu\epsilon$.

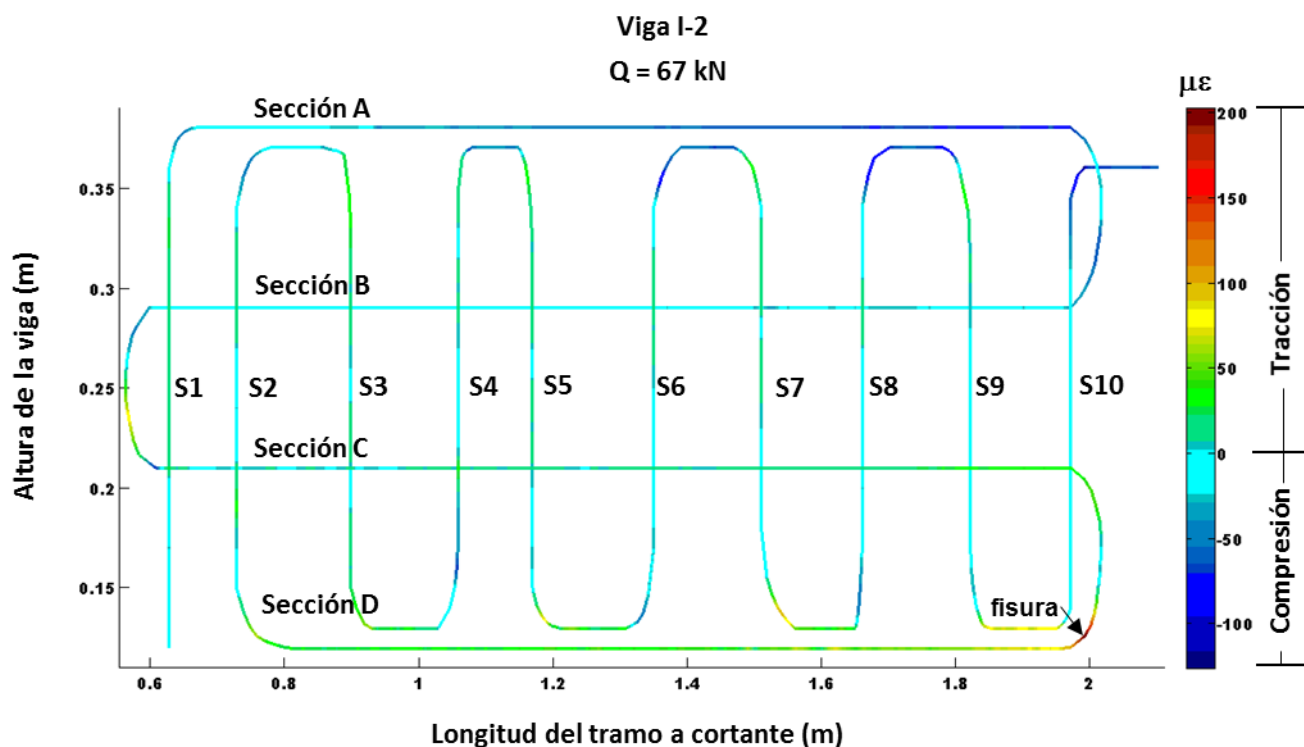


Fig. 6.8 Distribución de deformaciones en el SFOD de la viga I-2 con $Q = 67$ kN.

En la Fig 6.9 se presenta la aparición de fisuración en la zona instrumentada con SFOD para el caso de la viga I-3. En esta viga, el umbral de fisuración se estableció a partir de las 171 $\mu\epsilon$. En esta figura se puede apreciar que la fisuración en esta zona de la viga, se produce simultáneamente en la sección D del SFOD y entre las secciones verticales S9 y S10. Su localización se encuentra aproximadamente entre los 1.5 y 1.6 m de la sección D con respecto al sistema de referencia establecido para el análisis de esta viga. La carga a la cual se presenta esta distribución de la deformación es de 158 kN.

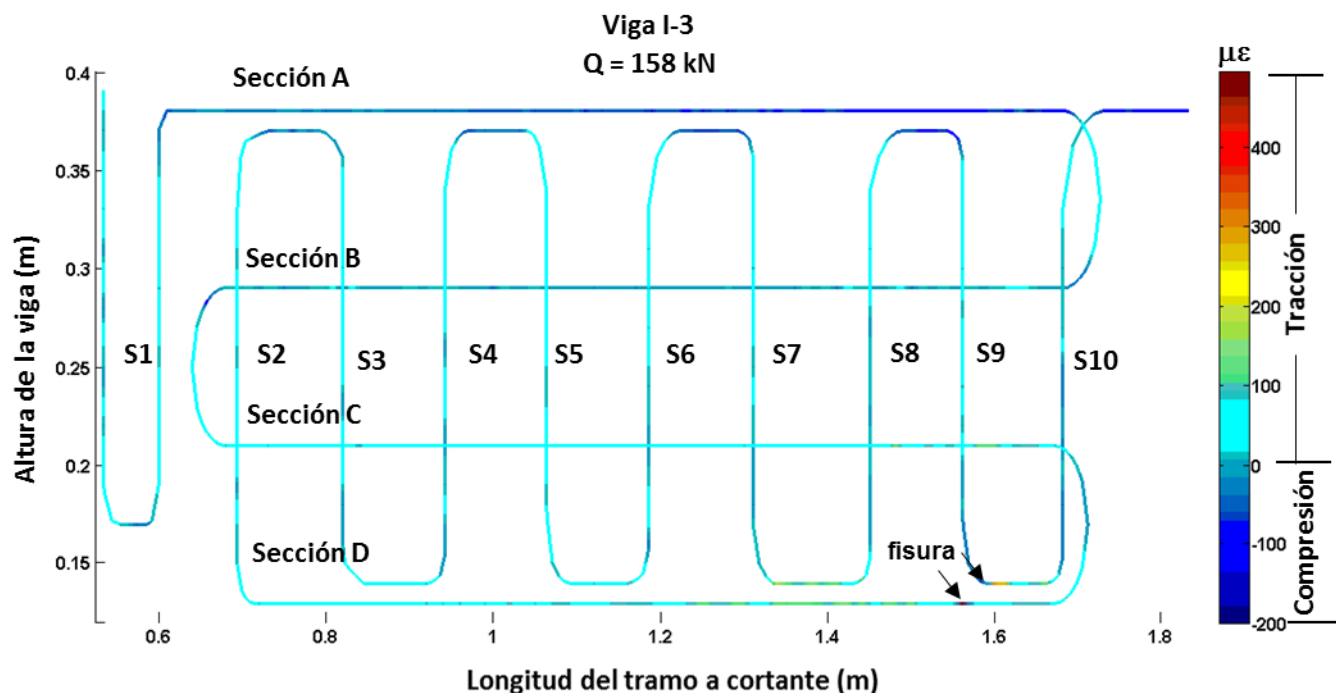


Fig. 6.9 Distribución de deformaciones en el SFOD de la viga I-3 con $Q = 158 \text{ kN}$.

Una vez identificadas las primeras fisuras en las zonas instrumentadas con SFOD en cada una de las vigas ensayadas (Figs 6.7 a 6.9), es posible analizar la forma en la que se modifica la distribución de las deformaciones en dicha zona, después de iniciada la fisuración de cada viga. Al respecto se puede apreciar que cada viga tuvo un inicio de fisuración a una carga distinta, siendo la viga I-1 la primera en fisurar, la viga I-2 la segunda y la viga I-3 fue la que presentó fisuración a un nivel de carga mayor.

De acuerdo con la Tabla 5.1 del capítulo cinco, las vigas I-1 e I-2 presentaban iguales dimensiones geométricas. Con relación a las armaduras, la viga I-1 tenía una armadura pasiva longitudinal con 2 barras de diámetro $\phi 25$ más que la viga I-2. Sin embargo, la viga I-2 tenía una separación de estribos a cada 15 cm, mientras que la viga I-1 a cada 25 cm. También cabe señalar que la Tabla 5.2 se indica un umbral de deformación a tracción ϵ_{fct} de la viga I-2 mayor que el establecido para la viga I-1.

En cuanto a la viga I-3, la carga con la cual apareció la primera fisura en la zona instrumentada con SFOD, fue mucho mayor que en las dos vigas anteriores. En este caso, la viga I-3 tenía un alma de 18 cm de espesor, respecto a los 12 cm de las vigas I-1 e I-2 (Tabla 5.1). De la misma forma, como se muestra en la Tabla 5.2, el umbral de deformación a tracción ϵ_{fet} de la viga I-3 era de 172 $\mu\epsilon$, con relación a las 126 $\mu\epsilon$ y 152 $\mu\epsilon$ que se establecieron para las vigas I-1 e I-2 respectivamente.

Es importante mencionar, que el inicio de las fisuras detectadas y las cargas correspondientes, solamente son válidas para el estudio de la zona instrumentada con SFOD, a fin de conocer la sensibilidad y capacidad de detección del sistema OBR en elementos de hormigón sujetos a cortante. Durante todos los ensayos, las vigas presentaron previamente fisuras en zonas cercanas a la aplicación de la carga o al centro del vano, antes que en la zona instrumentada con SFOD. En las Figs. 6.10 y 6.11 se pueden observar algunos ejemplos de fisuras previas o fuera de la región del alma de las vigas instrumentadas con SFOD.



6.10 Fisura bajo la carga y fuera de la zona instrumentada con SFOD en la viga I-1.



6.11 Fisura bajo la carga y fuera de la zona instrumentada con SFOD en la viga I-3.

Conforme el nivel de carga fue en aumento en cada ensayo, se llevó a cabo la detección y localización de fisuras en la zona de cortante de cada una de las vigas. Para ello se realizó un análisis de la distribución y evolución de las deformaciones en función del incremento de carga durante cada ensayo.

De esta forma se pudo evaluar la capacidad y sensibilidad del sistema OBR en la detección y localización oportuna de fisuras de cortante, y también establecer una metodología para la conformación del patrón de fisuración por cortante en forma progresiva.

En las Figs. 6.12, 6.14 y 6.18, se muestran con línea punteada las historias de carga de cada uno de los ensayos realizados. En estas figuras también se distinguen pero con una línea continua los niveles de carga hasta los cuales se llevó a cabo el análisis de las deformaciones para detectar y localizar fisuras por cortante. Estos límites se establecieron debido a que en cada uno de los ensayos, los SFOD presentaban información poco confiable en los puntos de fisuración detectados a partir de ciertos niveles de carga. Este fenómeno se explica con mayor detalle más adelante.

Con relación a la información que se obtuvo por medio del sistema OBR en todos los ciclos de carga y descarga que conformaron los tres ensayos, cabe mencionar que este trabajo se ha limitado a analizar la información referente a la primera rama descendente. Lo anterior se justifica debido a que el principal objetivo de este trabajo ha sido evaluar la capacidad del sistema para detectar y medir anchos de fisura. Al tratarse de una experiencia nueva, con pocas referencias en la literatura, el análisis de la información se ha limitado solamente al estudio de aquella en la cual la fibra ha presentado un comportamiento adecuado en los puntos de fisuración.

6.2.3.1 Viga I-1

La detección se realizó gracias a poder identificar de forma simultánea, la presencia de fisuras en las secciones horizontales y verticales de los SFOD en la zona de cortante de cada una de las tres vigas ensayadas, con excepción de la viga I-1. En esta viga, la captura de las deformaciones, como se mencionó anteriormente en el capítulo 5, se realizó con lecturas temporales alternadas con un SFOD1 adherido a la viga en la zona de cortante en dirección horizontal, y un SFOD2 adherido en dirección vertical. Durante este ensayo, el SFOD2 no funcionó en forma adecuada, por lo que las deformaciones en dirección vertical no fueron capturadas durante los primeros ciclos de carga. Por lo anterior, para el análisis de la viga I-1, se tuvo que utilizar únicamente las deformaciones horizontales obtenidas en las diferentes secciones del SFOD1.

En la Fig. 6.12 se muestra con línea continua un valor aproximado de 262 kN, condición de carga bajo la cual se realizó el análisis del estado de fisuración de la viga.

La Fig 6.13 muestra diferentes puntos del SFOD1 en los cuales el umbral de la deformación por tracción para la viga I-1 ($126 \mu\epsilon$), fue superado para el valor de la carga mencionado anteriormente. Si los puntos anteriores se consideran como puntos de fisuración, se aprecia que la región de la viga sujeta a cortante bajo una carga de 262 kN, ya presentaba una presencia importante de fisuras.

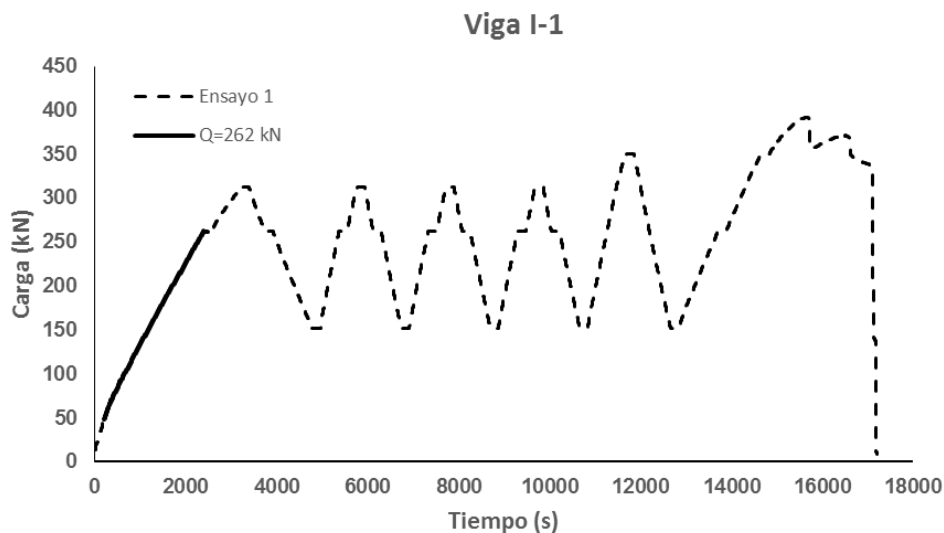


Fig. 6.12 Nivel de carga $Q = 262 \text{ kN}$ para la detección y localización de fisuras en la viga I-1.

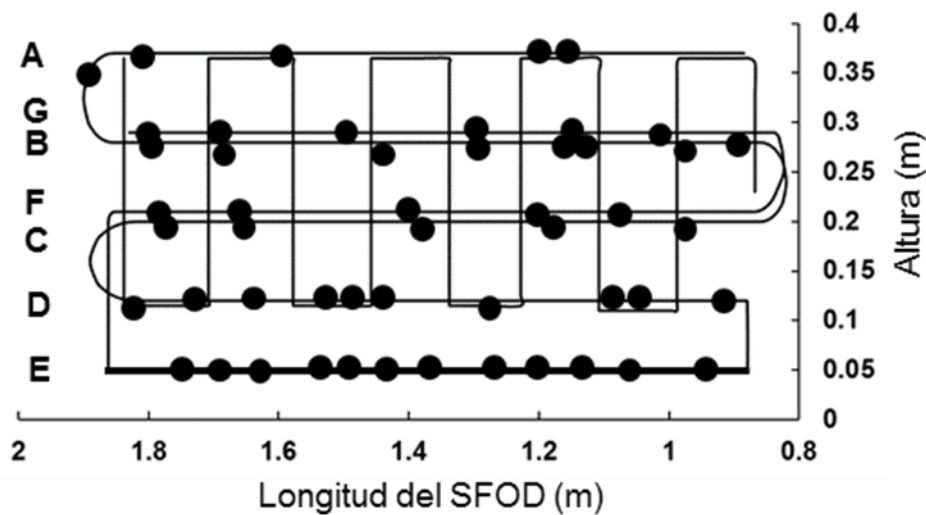


Fig. 6.13 Puntos en el SFOD1 con una deformación mayor a las $126 \mu\epsilon$ en la viga I-1 para una carga de 262 kN.

Debido a la posibilidad de programar el sistema OBR para realizar capturas cada cierto intervalo de tiempo, durante el ensayo de la viga I-1 se tuvo la posibilidad de obtener cada 1s una lectura de deformación a lo largo de todo el SFOD1. Así, se pudo establecer el orden en el que fueron apareciendo cada uno de los puntos de fisuración a lo largo de las diferentes secciones en las que se dividió el SFOD1.

En la Fig 6.14 se asigna a los mismos puntos que se muestran en la Fig 6.13, una letra que corresponde a una sección determinada del SFOD1, y un número que indica el orden de aparición del punto de fisuración dentro de esa sección. También y gracias al sistema de referencia X-Y establecido con anterioridad, se pudo localizar cada uno de estos puntos y asignarles una coordenada dentro de la región de la viga instrumentada con el SFOD1.

En las tablaA.1 del anexo A de este trabajo, se resume la identificación y localización de cada punto dentro de las diferentes secciones en las que se dividió el SFOD1. En la tabla A.1 también se indican los diferentes niveles de carga a los que se fueron presentando cada uno de estos puntos.

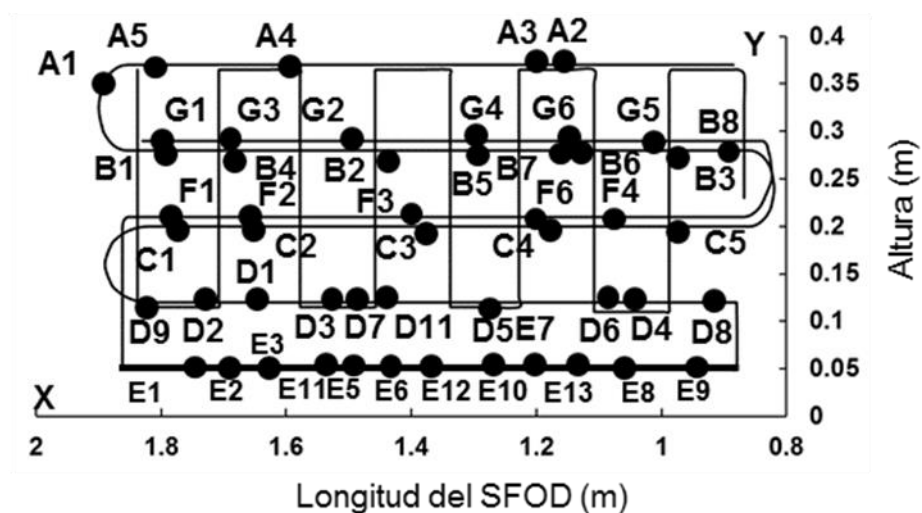


Fig. 6.14 Identificación de puntos de fisuración en el SFOD1 de la viga I-1.

De esta forma se puede establecer para cada sección del SFOD1, la relación entre cada punto de fisuración y la carga correspondiente a su detección y localización

También resulta interesante poder identificar estos mismos puntos de fisuración ya no por sección, sino a todo lo largo del SFOD1 a medida que aumenta el nivel de carga. Lo anterior se muestra en las tablas A.2a y A.2b del anexo A.

En estas tablas se puede identificar en forma progresiva y en función del nivel de carga, desde el primero hasta el último punto de fisuración en la región de la viga I-1 instrumentada con el SFOD1. Lo anterior es una de las grandes ventajas que presenta el sistema OBR respecto a sistemas de medición convencionales.

En el caso de la viga I-1, se observa en la Tabla A.2a como a una nivel de carga de 47 kN aparece la primera fisura E1, en el patín o ala inferior de la viga. Conforme el nivel de carga aumenta, de manera progresiva aparecen otros puntos de fisuración. De acuerdo al sistema de referencia, los siguientes puntos se identifican en la parte inferior de la viga I-1 y los últimos (Tabla A.2b) a secciones del SFOD1 que se encuentran en la parte superior del alma.

6.2.3.2 Viga I-2

En forma similar a la viga anterior, en la Fig. 6.15 se muestra con línea punteada toda la historia de carga del ensayo de la viga I-2, y con una línea continua, el nivel de carga en el cual se realizó el análisis del estado de fisuración de esta viga. En este estado, la carga tenía un valor aproximado de 260 kN. Los puntos de fisuración en la región de cortante se muestran en la Fig. 6.16.

Durante el ensayo de la viga I-2, se utilizó solamente un SFOD con el cual se conformó la malla que se muestra en la Fig. 6.16. A diferencia del ensayo de la viga I-1, en la que solamente se detectaron puntos de fisuración en el SFOD1 colocado en dirección horizontal, con esta malla se pudieron detectar puntos de fisuración en dos direcciones perpendiculares.

La Fig. 6.17 muestra la identificación de los puntos de fisuración anteriores, los cuales en esta viga, se detectan a partir de valores de deformación superiores a las $152 \mu\epsilon$.

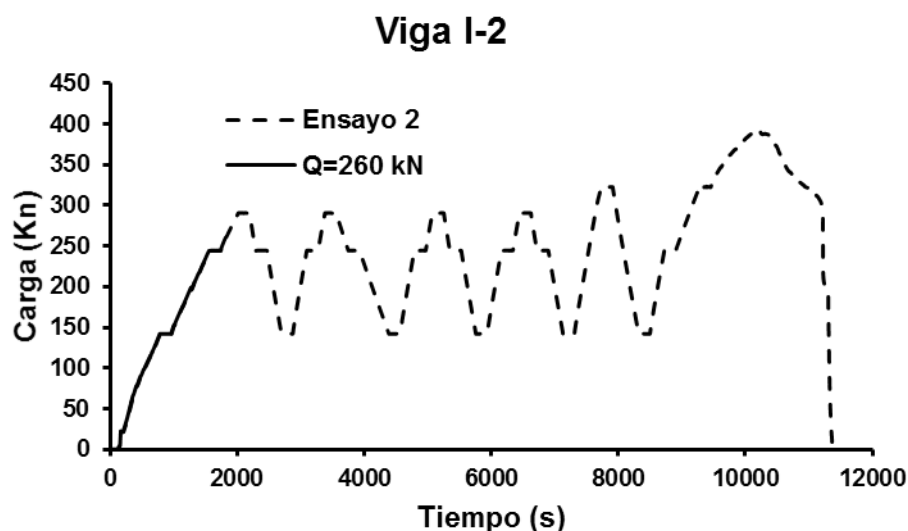


Fig. 6.15 Nivel de carga $Q = 260 \text{ kN}$ para la detección y localización de fisuras en la viga I-2.

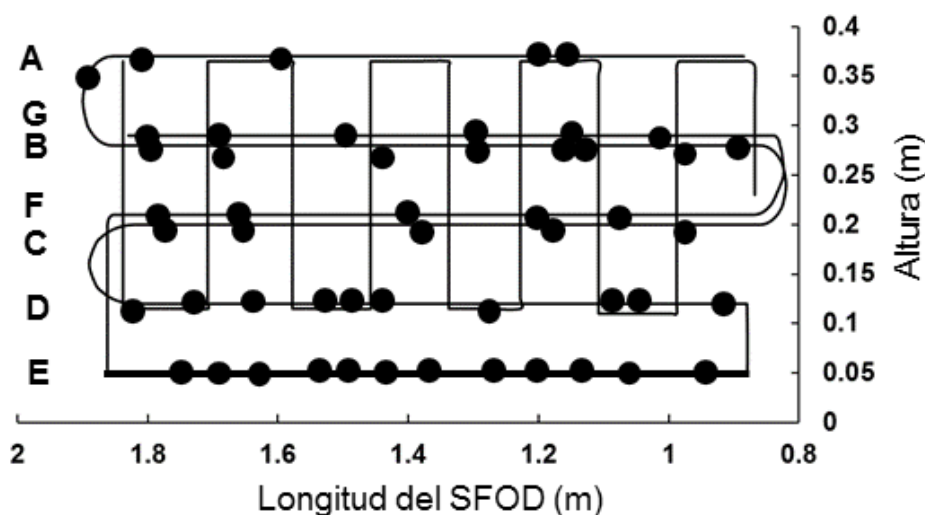


Fig. 6.16 Puntos en el SFOD1 con una deformación mayor a las $152 \mu\epsilon$ en la viga I-2.

En el SFOD1 de esta viga se identifican con las letras A, B, C y D las secciones horizontales, y con los números del 1 al 10, las distintas secciones verticales del mismo SFOD1. En las Tablas A.3 a A.12 del anexo A se muestran las coordenadas y la carga asociada a la identificación de todos los puntos de fisuración detectados en la región instrumentada asociados a una carga próxima a los 260 kN y en las secciones horizontales del SFOD1.

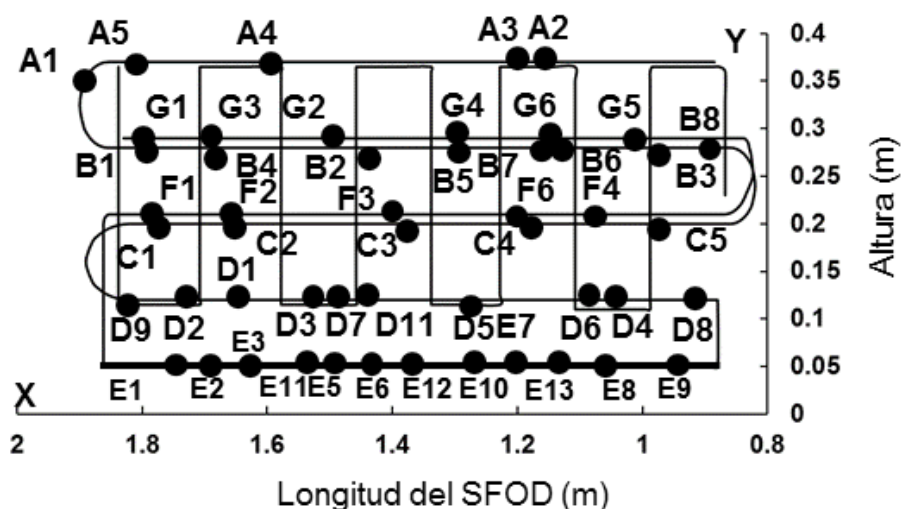


Fig. 6.17 Identificación de posibles puntos de fisuración en el SFOD1 de la viga I-2.

En las tablas A.4 del anexo A se resumen la localización y los niveles de carga asociadas a los puntos de fisuración detectados en las secciones verticales del SFOD1. La obtención de esta información enriquece las posibilidades de cuantificar los efectos del esfuerzo cortante en la región de la viga I-2 por medio del sistema de medición OBR.

En las Tablas A.5a y A.5b del anexo A se muestra el orden progresivo en el que se fueron detectando los diferentes puntos de fisuración, junto con el nivel de carga correspondiente. Se puede apreciar, como la fisuración se presenta por primera vez en la parte inferior del alma de la viga I-2.

El primer punto de fisuración detectado es el denominado como D1, con una $Q = 68$ kN. A partir del punto D1, y como se observa en la Fig. 6.17, se pueden identificar los demás puntos de fisuración en forma progresiva.

Como en el caso de la viga I-1, esta identificación de puntos es un primer paso para posteriormente poder llevar a cabo el trazo de los diferentes patrones de fisuración por cortante que se conformaron en esta viga, con relación a un nivel de carga determinado.

6.2.3.3 Viga I-3

Al igual que las dos vigas anteriores, en la Fig. 6.18 se muestra con línea punteada toda la historia de carga del ensayo de la viga I-3, y con una línea continua, el nivel de carga en el cual se realizó el análisis del estado de fisuración de esta viga. En este estado, la carga tenía un valor aproximado de 258 kN. Los puntos de fisuración detectados se muestran en la Fig. 6.19.

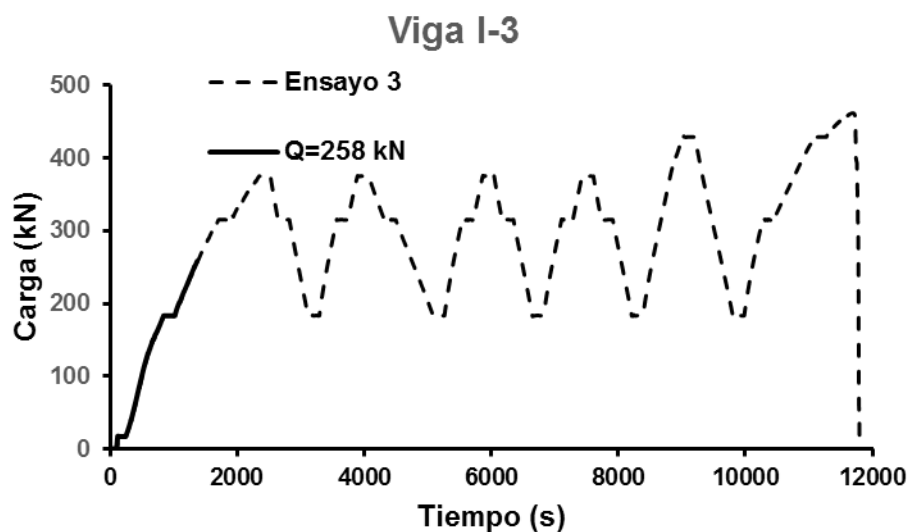


Fig. 6.18 Nivel de carga $Q = 258 \text{ kN}$ para la detección y localización de fisuras en la viga I-3.

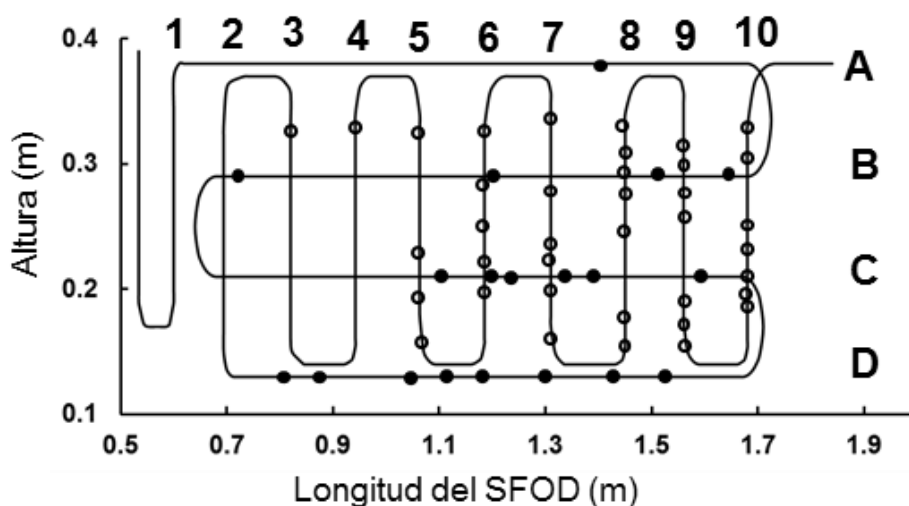


Fig. 6.19 Puntos en el SFOD1 con una deformación mayor a las $172 \mu\epsilon$ en la viga I-3.

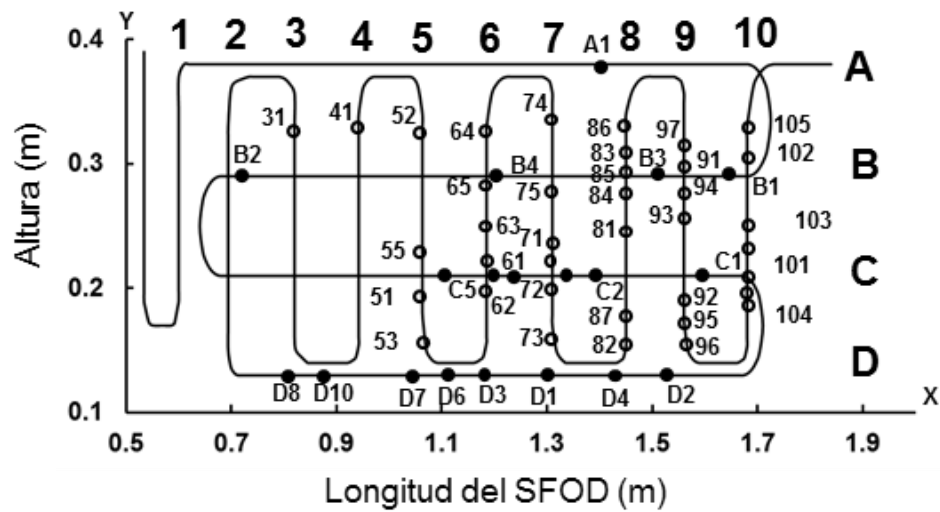


Fig. 6.20 Identificación de posibles puntos de fisuración en el SFOD1 de la viga I-3.

En la Fig. 6.20 se muestra la identificación de los puntos de fisuración detectados por medio del SFOD1 en la viga I-3 hasta el nivel de carga de 258 kN. Para la identificación de estos puntos de fisuración, el umbral de deformación a tracción para el hormigón de esta viga fue de $172 \mu\epsilon$.

Como en los casos anteriores, en las tablas A.6 y A.7 del anexo A se muestran los puntos de fisuración identificados en cada una de las secciones horizontales y verticales, junto con el nivel de carga en el cual fueron detectados por el sistema OBR.

En este caso y a diferencia de las vigas anteriores, la viga I-3 presentó un primer punto de fisura en la sección vertical 10 del SFOD1. Esta sección es muy próxima al punto de aplicación de la carga durante el ensayo, y se identificó a un nivel de carga de 155 kN. Posteriormente y con un nivel de carga de 157 kN, se presentó la primera fisura D1 en la parte inferior del alma de la viga.

En las Tablas A.8a y A.8b se muestra en orden en el cual se presentaron todos los puntos de fisuración identificados tanto en las secciones horizontales A, B, C y D, como los puntos identificados en las secciones verticales 1 a 10.

La información anterior, muestra el potencial que tiene la aplicación de este tipo de sistema de medición en el campo de la MSE. La detección y localización de los puntos de fisuración anteriores, no sólo es resultado de la medición continua de la deformación, sino de la gran resolución espacial con la que se obtiene y que es la característica fundamental del sistema OBR.

A partir de esta detección y localización de puntos de fisuración, se abren varias posibilidades para obtener información que sea de utilidad para realizar un diagnóstico adecuado de un sistema estructural, como puede ser el análisis de la distribución de las deformaciones, el trazo de los patrones de fisuración, y el cálculo del ancho de las fisuras.

6.2.4 Análisis de deformaciones por medio de los SFOD

Una vez localizados los puntos de fisuración por cortante, también es posible obtener las deformaciones en el alma de las vigas ensayadas a lo largo de cada una de las secciones horizontales y verticales en las que fueron divididos los SFOD.

6.2.4.1 Viga I-1

Para el caso de la viga I-1, las Figs. 6.21 y 6.22 muestran simultáneamente la distribución de las deformaciones en cada una de las secciones que conforman el SFOD1 para un mismo nivel de carga.

Estas gráficas pueden ser trazadas gracias a la resolución espacial de 1 cm con la que se realizó la captura de la información a través del sistema OBR. Con una línea puntada horizontal, se indica el umbral de deformación por tracción para el hormigón de la viga, a partir de cual se establece la presencia de una fisura.

Es así como en la parte inferior de la Fig 6.22, se aprecia como en la sección E del SFOD1 para una carga de 47 kN, el umbral de deformación por tracción ϵ_{ct} de $126 \mu\epsilon$ es superado ligeramente en el punto E1, en el cual se presenta una fisura. También se observa que las secciones restantes presentan niveles de deformación bajos y de acuerdo a su posición dentro del alma de la viga.

La sección A (Fig. 6.21) presenta deformaciones de compresión cercanas a las $60 \mu\epsilon$. Las secciones G y B (Fig. 6.21), que se encuentran muy próximas entre sí, indican valores de compresión ligeramente superiores a cero, mientras que en las secciones F y C (Fig. 6.22) se observan valores de deformación prácticamente nulos. Lo anterior indica la proximidad de estas dos secciones con la posición del eje neutro de la sección transversal de la viga I-1.

Cabe recordar que en el pegado del SFOD1 a la superficie de hormigón de la viga se utilizó un adhesivo epoxi para las secciones A hasta la E. En las secciones G y F se utilizó cianoacrilato, y un adhesivo de silano modificado respectivamente.

Con base en resultados de estudios similares, se han derivado algunas experiencias previas en el uso de distintos tipos de adhesivos. En general se ha observado que cuando los SFOD son adheridos en superficies como el acero o materiales compuestos, los cianoacrilatos tienen un mejor comportamiento. En superficies más rugosas como el hormigón, los adhesivos epoxi son los que han presentado los mejores resultados (Regier, 2013, Regier y Hoult, 2014).

Por lo anterior, en este ensayo las secciones A a E del SFOD1 fueron tomadas como referencia y adheridas al alma de la viga I-1 con un epoxi, mientras que las secciones G y F, fueron adheridas con los tipos de adhesivos antes mencionados. Lo anterior con el objeto de comparar a un nivel básico, la influencia del tipo de adhesivo utilizado en el pegado de los SFOD, en la obtención de las deformaciones.

En este sentido y para el nivel de carga de 47 kN, tanto las secciones G y B, y F y C presentan todavía un comportamiento muy similar.

En las Figs. 6.23 a 6.28 se muestra la variación de las deformaciones en la viga I-1, para niveles de carga comprendidos entre 60 y 71 kN. En ellas se aprecia como para un nivel de carga de 60 kN, el estado de deformaciones de la viga presenta nuevamente la misma fisura en la sección E, pero en esta ocasión con un nivel de deformación mayor. En la Fig. 6.22 se aprecia un valor pico en la fisura de $137 \mu\epsilon$, mientras que en la Fig. 6.24 presenta un valor de $350 \mu\epsilon$. De esta manera se muestra como gracias a las ventajas que ofrece el sistema OBR, una fisura puede ser detectada, localizada y cuantificada en términos de micro deformaciones.

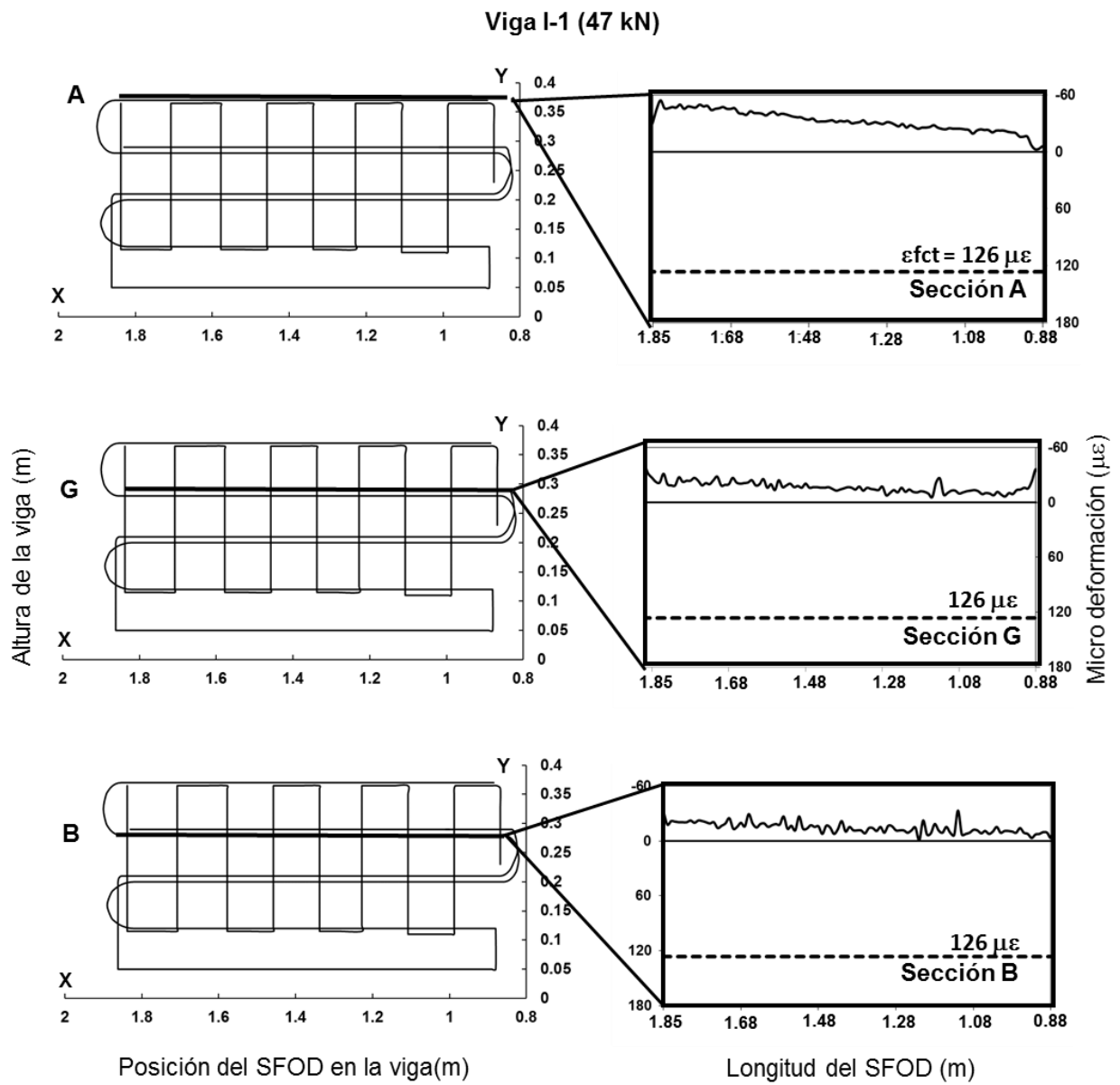


Fig. 6.21 Deformaciones en las secciones A, B y G del SFOD1 en la viga I-1 (47 kN).

Viga I-1 (47 kN)

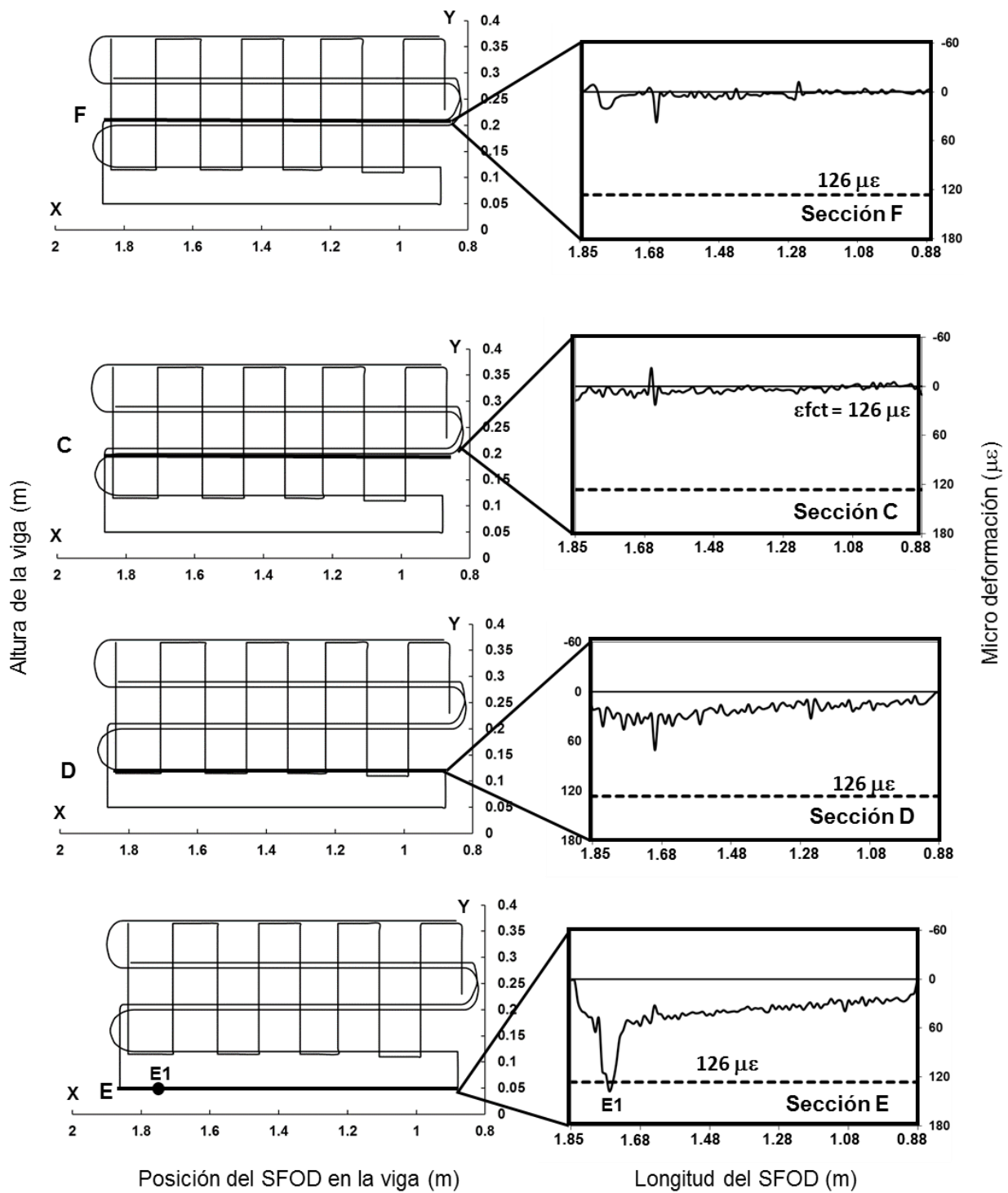


Fig. 6.22 Deformaciones en las secciones C, F, D y E del SFOD1 en la viga I- (47 kN).

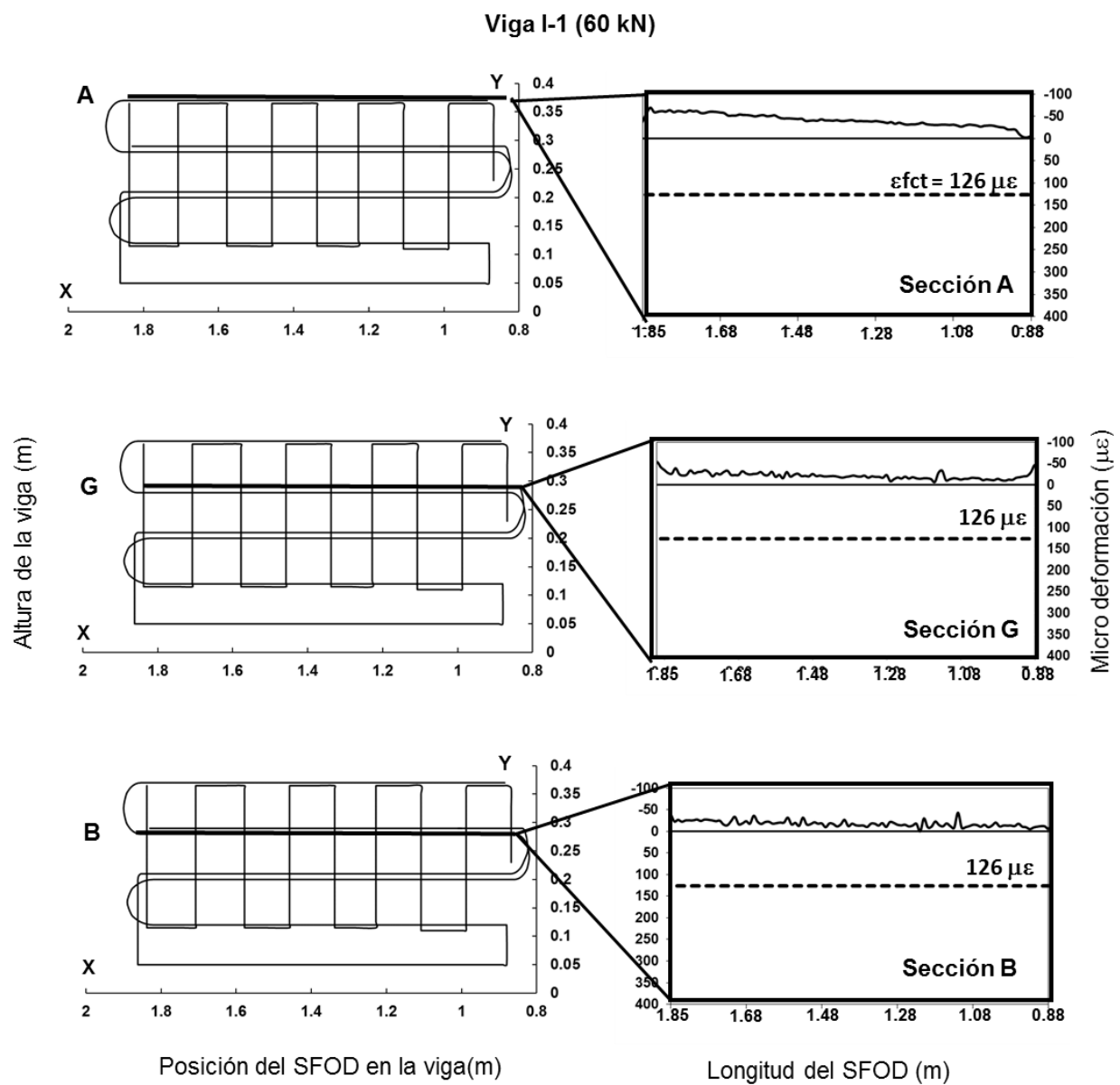


Fig. 6.23 Deformaciones en las secciones A, B y G del SFOD1 en la viga I-1(60 kN).

Viga I-1(60 kN)

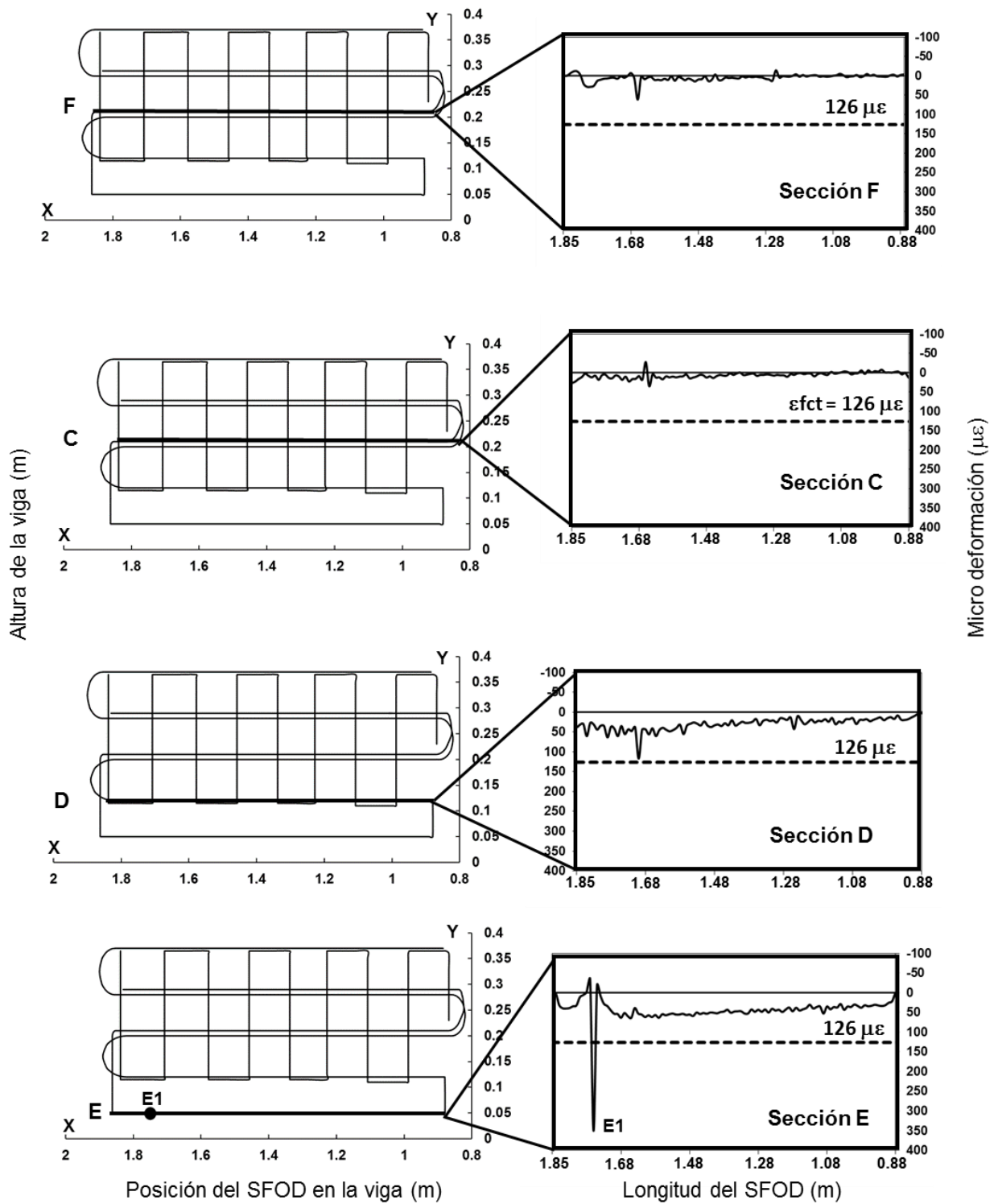


Fig. 6.24 Deformaciones en las secciones C, F, D y E del SFOD1 en la viga I-1 (60 kN).

En la Fig. 6.24 también se puede observar como en la sección D, existe un punto próximo a la coordenada en 1.68 m, cercano al umbral de fisuración de $126 \mu\epsilon$. Posteriormente, las Figs 6.25 y 6.26 muestran la distribución de deformaciones a un nivel de carga de 62 kN. Se puede observar en la Fig. 6.26 como en la sección D aparece un pico superior al umbral de fisuración, y que de acuerdo al sistema de referencia establecido, le corresponde una coordenada (1.64, 0.12 m) y se denomina D1.

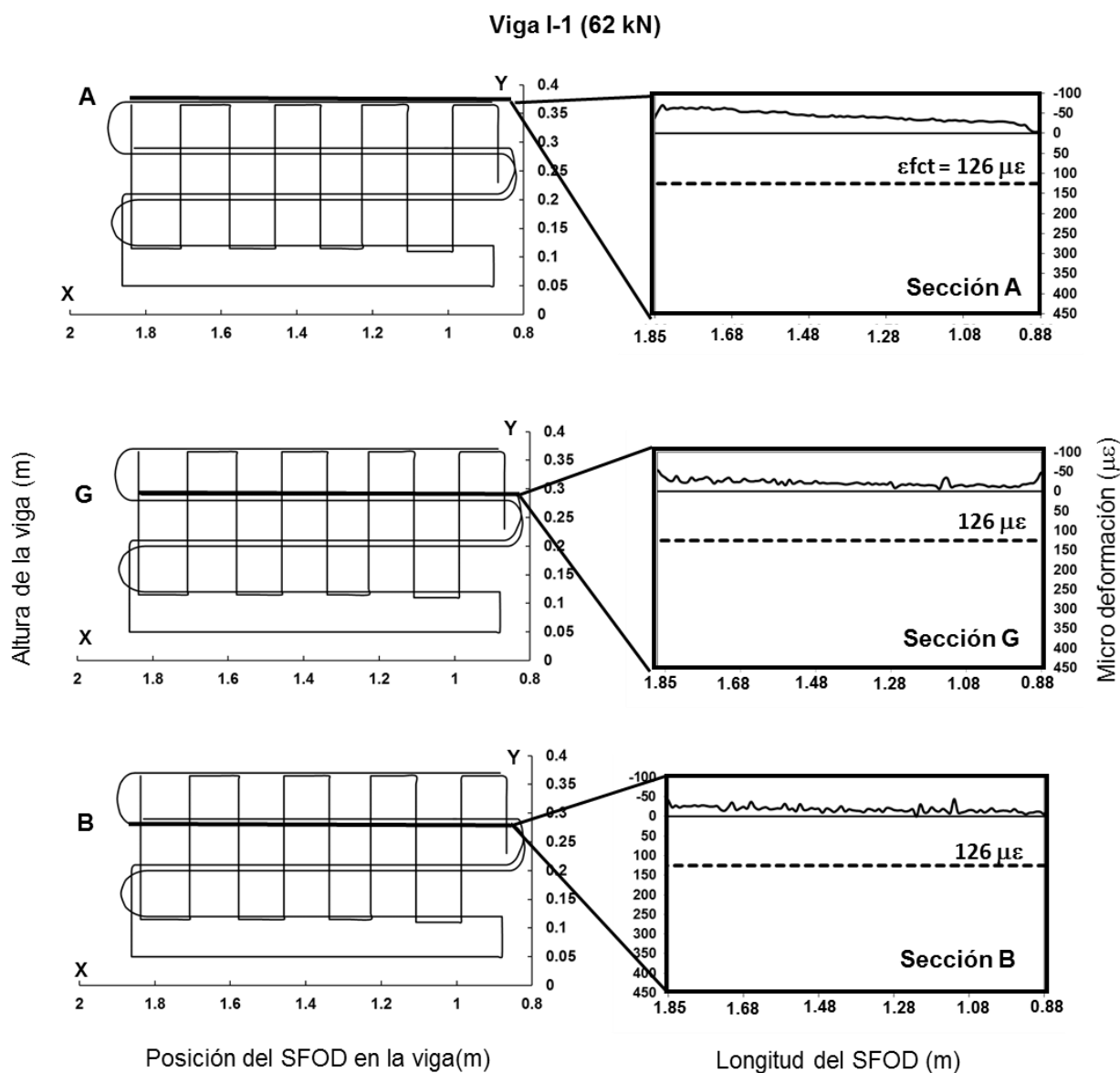


Fig. 6.25 Deformaciones en las secciones A, B y G del SFOD1 en la viga I-1(62 kN)

Viga I-1 62 (kN)

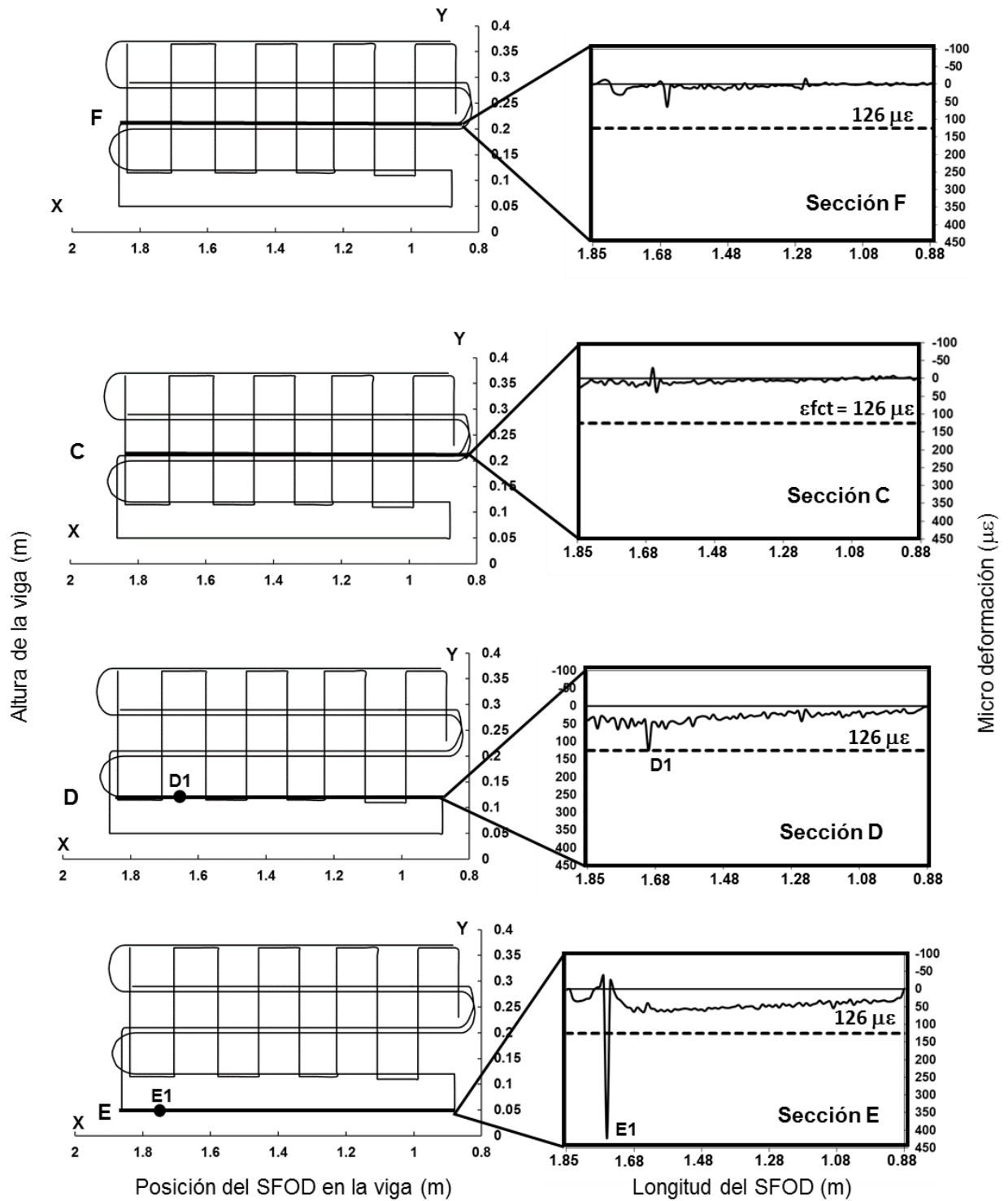


Fig. 6.26 Deformaciones en las secciones C, F, D y E del SFOD1 en la viga I-1 (62 kN).

En las Figs. 6.27 y 6.28 se muestran las distribuciones de deformación que corresponden a un nivel de carga de 71 kN. Los cambios más significativos que se aprecian respecto al nivel de carga mostrado con anterioridad aparecen nuevamente en las secciones E y D. La fisura localizada en la sección E, ahora presenta un valor de deformación en tracción cercano a las 4400 $\mu\epsilon$, como se aprecia en la Fig. 6.28. Dicho aumento en la deformación, se puede asociar a la apertura progresiva de la fisura detectada y localizada.

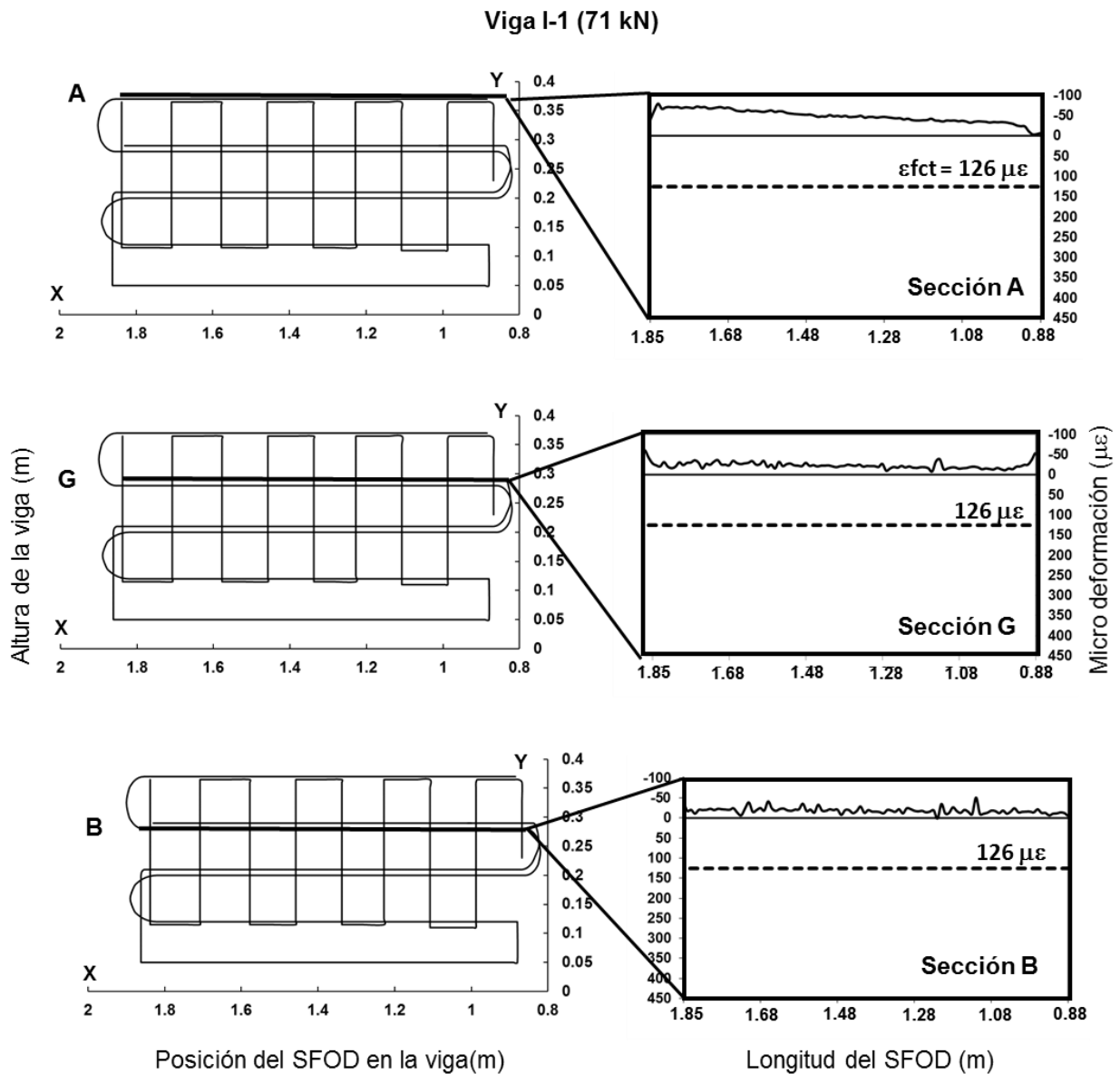


Fig. 6.27 Deformaciones en las secciones A, B y G del SFOD1 en la viga I-1(71 kN).

Viga I-1 71 (kN)

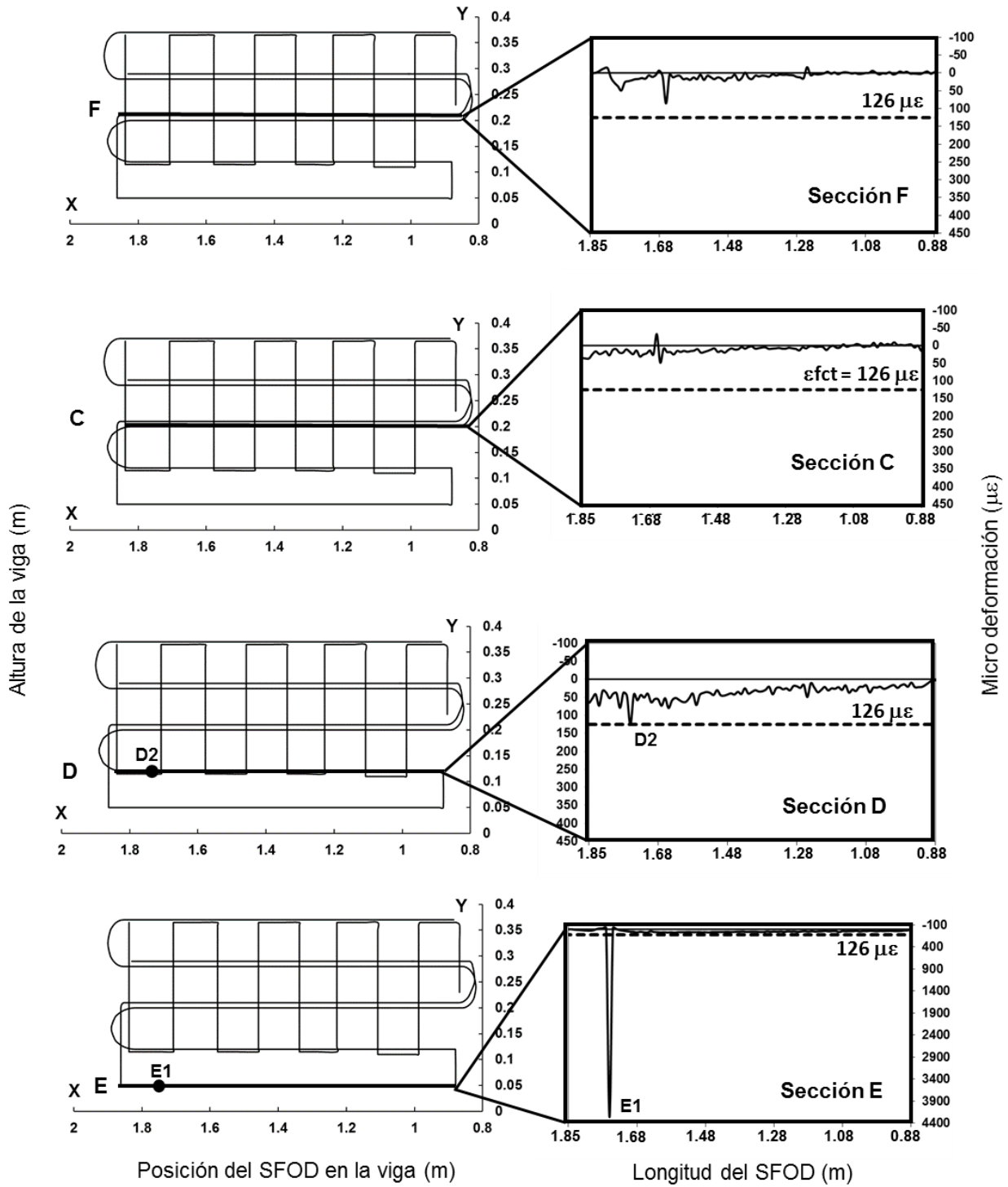


Fig. 6.28 Deformaciones en las secciones C, F, D y E del SFOD1 en la viga I-1(71 kN).

En la sección D, se presenta un nuevo punto. En la Fig. 6.28 se localiza dicho punto, al cual le corresponde la coordenada (1.72, 0.12 m) y se le denomina D2. En la misma figura se aprecia como el punto D1, que en la Fig. 6.26 presenta un valor de deformación en tracción ligeramente mayor al umbral de fisuración, en el caso de carga a 71 kN, presenta un valor menor al umbral de fisuración establecido para esta viga.

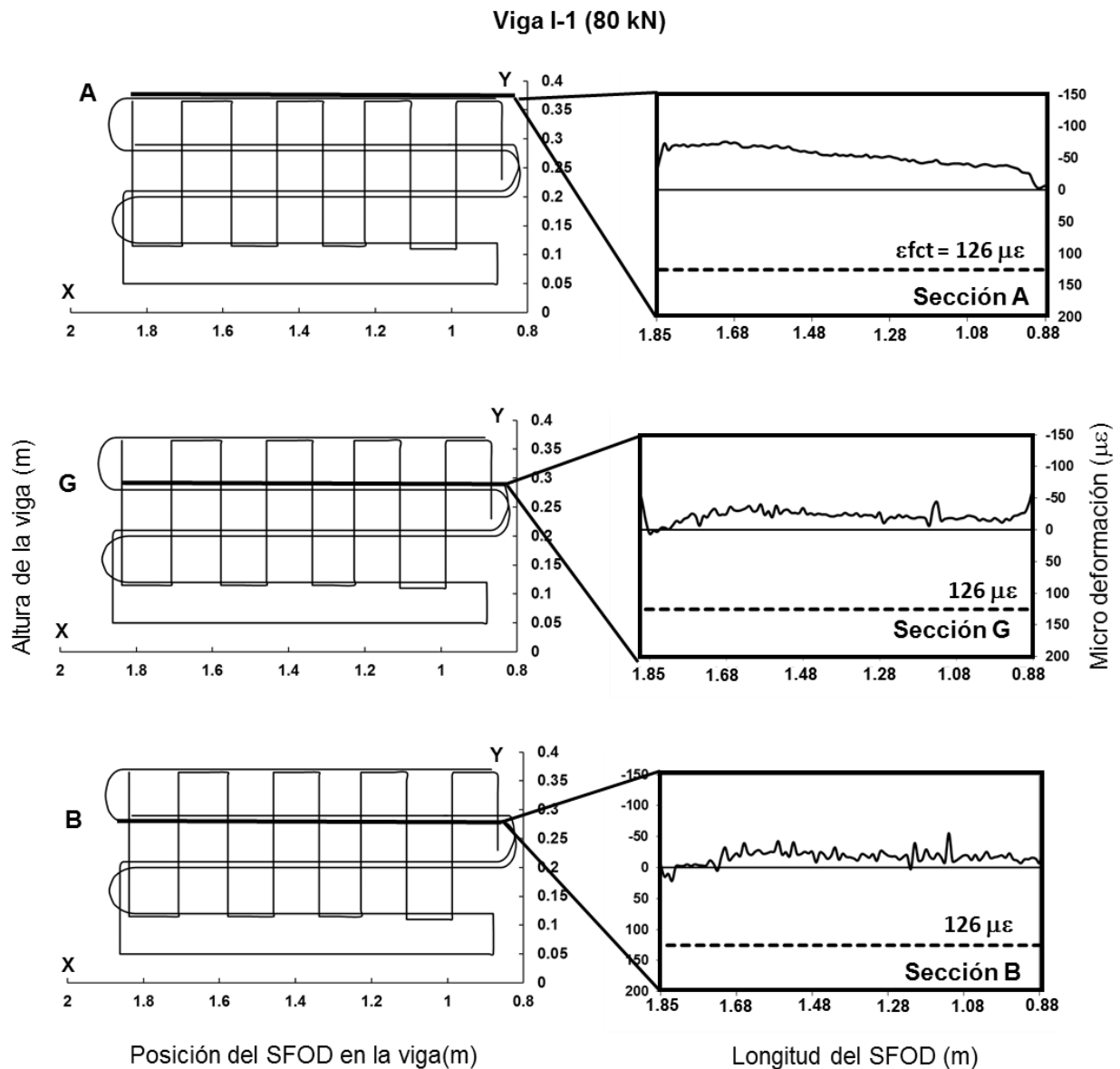


Fig. 6.29 Deformaciones en las secciones A, B y G del SFOD1 en la viga I-1(80 kN).

Lo anterior, puede estar asociado a un nivel de fisuración mínimo que en ocasiones puede resultar imperceptible a simple vista, y que en determinado momento puede presentar un cierre momentáneo de la fisura para posteriormente a niveles de carga superiores volver a abrir.

En las Figs. 6.29 y 6.30 se muestran las distribuciones de la deformación en las distintas secciones que conforman el SFOD1 para una carga de 80 kN. Se puede observar que a partir de este nivel de carga, las secciones muestran algunas diferencias en su comportamiento respecto a los casos de carga descritos con anterioridad. Por ejemplo, en la Fig. 6.29, se observan en la sección A deformaciones de compresión con valores máximos cercanos a las 100 $\mu\epsilon$. En las secciones B y G, que se encuentran adheridas al hormigón con epoxi y cianoacrilato respectivamente, las deformaciones por compresión presentan valores muy similares, cercanos a las 50 $\mu\epsilon$ y con un comportamiento similar en ambas secciones.

Respecto a las secciones C y F, que fueron adheridas a la superficie de la viga con epoxi y adhesivo silano modificado respectivamente, se observa en la Fig. 6.30 la detección de una primera fisura en la sección C. Esta fisura como algunos casos anteriores, debido al nivel de deformaciones tan cercano al umbral de deformación de fisuración, resulta imperceptible a la vista y con la posibilidad de cerrarse temporalmente. También en la Fig. 6.30 se observa como en la sección F, que se encuentra ubicada aproximadamente a 1 cm más arriba de la sección C, si bien aparecen incrementos de deformación a tracción importantes en la zona de la viga a los 1.68 m respecto del origen del sistema de referencia, dichos valores todavía no son superiores al umbral de fisuración establecido.

En la misma Fig. 6.30 se aprecia como las dos fisuras localizadas anteriormente en la sección D del SFOD1 se han cerrado de manera temporal. En esta figura también se aprecia como en la zona de la viga entre los 1.68 y los 1.85 m, aparece una primera zona de compresión en la sección D. En esta sección, y para los casos de carga anteriores siempre se habían presentado deformaciones de tracción. Lo anterior se puede interpretar como un primer indicio de la conformación de un mecanismo de cortante, en el cual el hormigón entre fisuras se encuentra generalmente sujeto a efectos de compresión así como a un efecto de redistribución de las tensiones por el efecto de la fisuración. En la sección E se aprecia que aparece una segunda fisura.

Viga I-1 80 (kN)

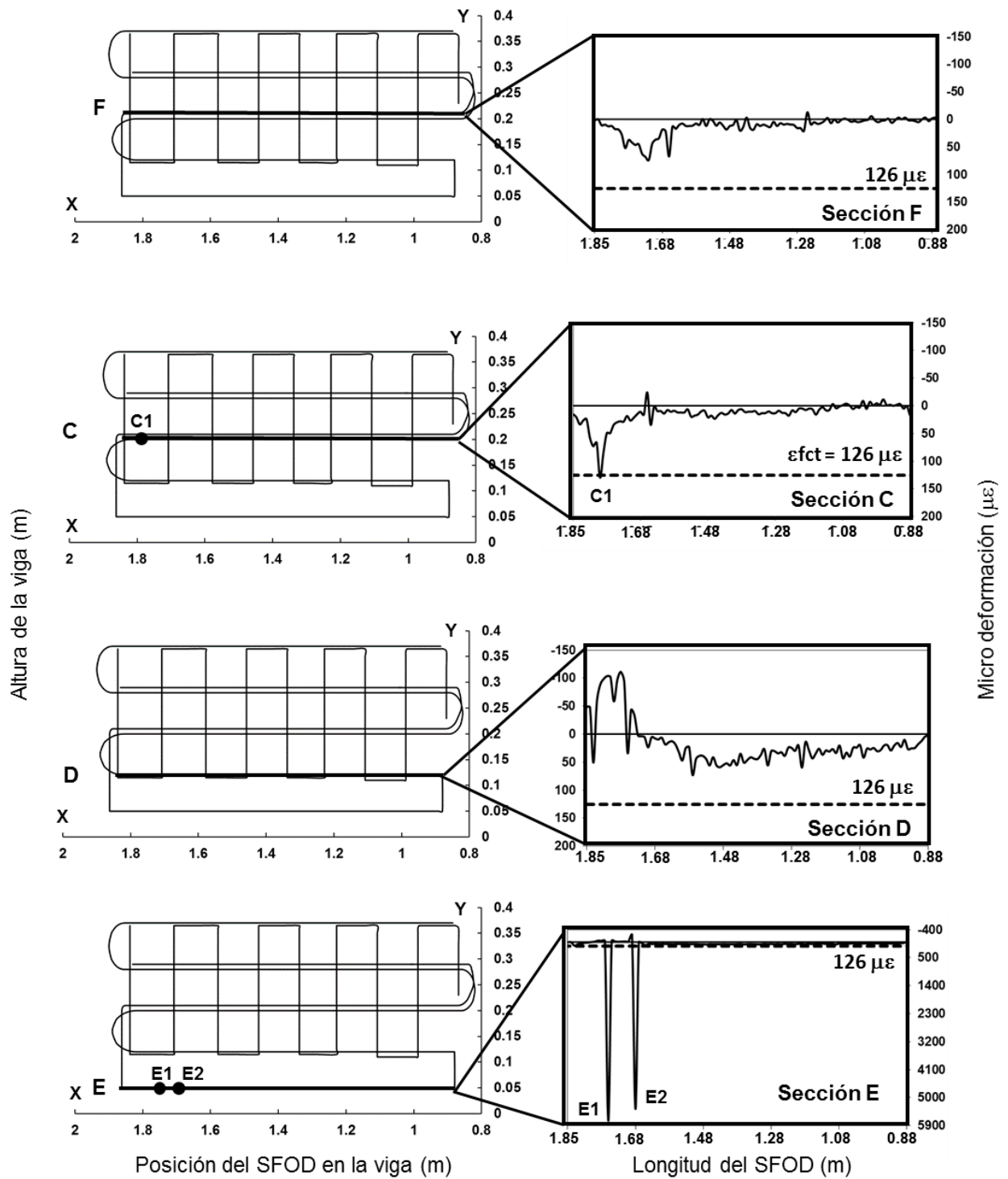


Fig. 6.30 Deformaciones en las secciones C, F, D y E del SFOD1 en la viga I-1 (80 kN).

En las Figs. 6.31 y 6.32 se muestran las deformaciones obtenidas a través del sistema OBR para un nivel de carga de 94 kN. Se puede observar en las secciones A, B y G, un aumento en las deformaciones, pero con la misma tendencia de comportamiento observado en los niveles de carga anteriores, esto es, sin la presencia de fisuras.

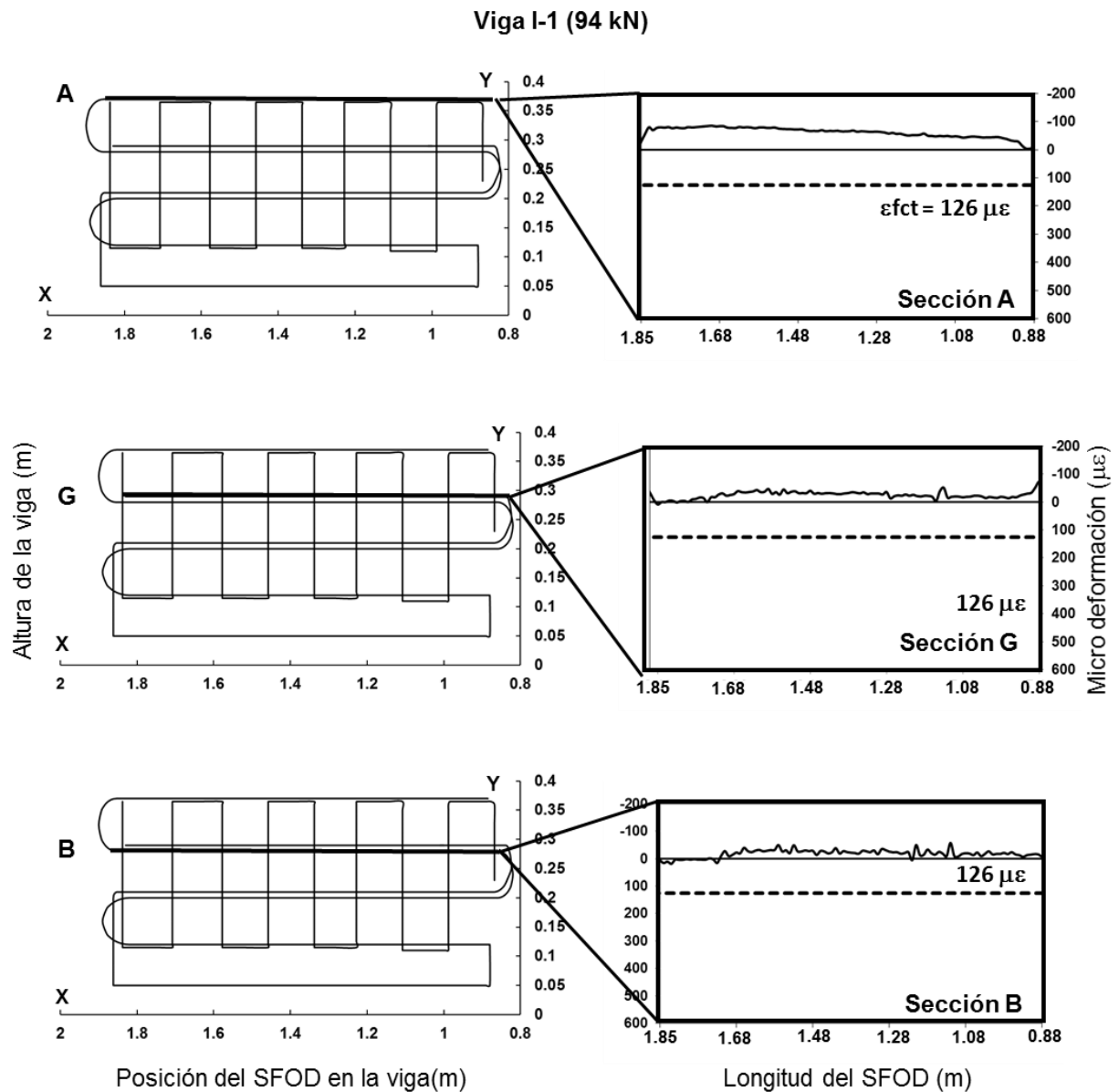


Fig. 6.31 Deformaciones en las secciones C, F, D y E del SFOD1 en la viga I-1 (94 kN).

Viga I-1 (94 kN)

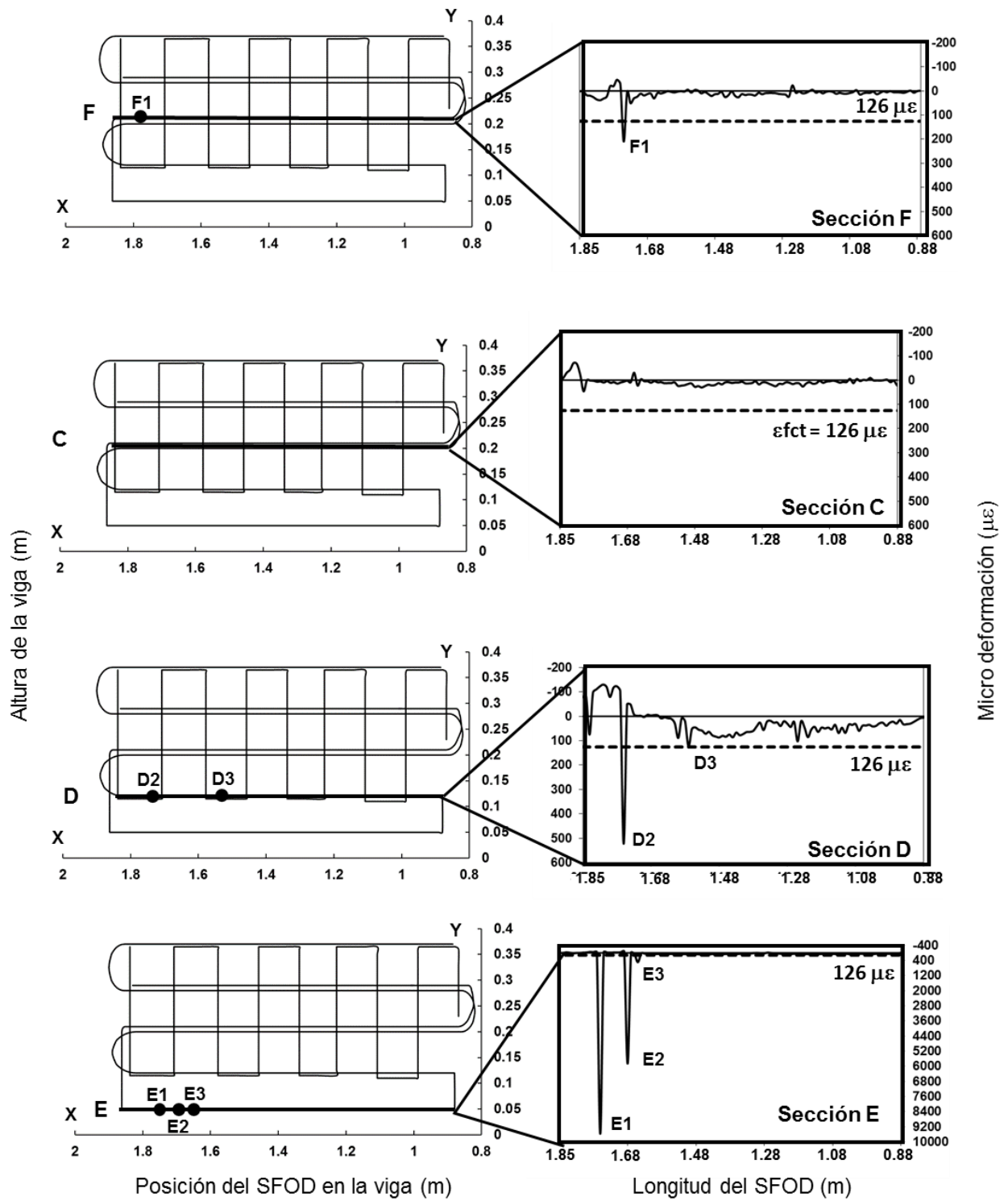


Fig. 6.32 Deformaciones en las secciones C, F, D y E del SFOD1 e la viga I-1 (94 kN).

En la Fig. 6.32 se observa la aparición de una primera fisura en la sección F, y el cierre momentáneo de la fisura que apareció anteriormente en la sección C. A su vez, también se aprecia la reapertura en forma simultánea de las dos fisuras localizadas en la sección D. Con relación a la sección E, la presencia de las dos fisuras localizadas anteriormente se mantiene, pero con un aumento considerable en la deformación de tracción asociada a una de ellas. En una fisura la deformación pico es cercana las 10000 $\mu\epsilon$. Además, aparece una tercera fisura E3

La continuación del análisis de la variación de los niveles de deformación en función del incremento de carga en la zona de cortante instrumentada con el SFOD1 para la viga I-1 se muestran entre las Figs. 6.33 a 6.54. En cada una de estas figuras se representa la variación de la deformación, y la detección y localización de manera progresiva de una o varias fisuras con relación a un nivel de carga determinado. Las coordenadas de cada uno de los puntos localizados en las secciones del SFOD1 de esta viga se muestran en las Tablas 6.1 a 6.7.

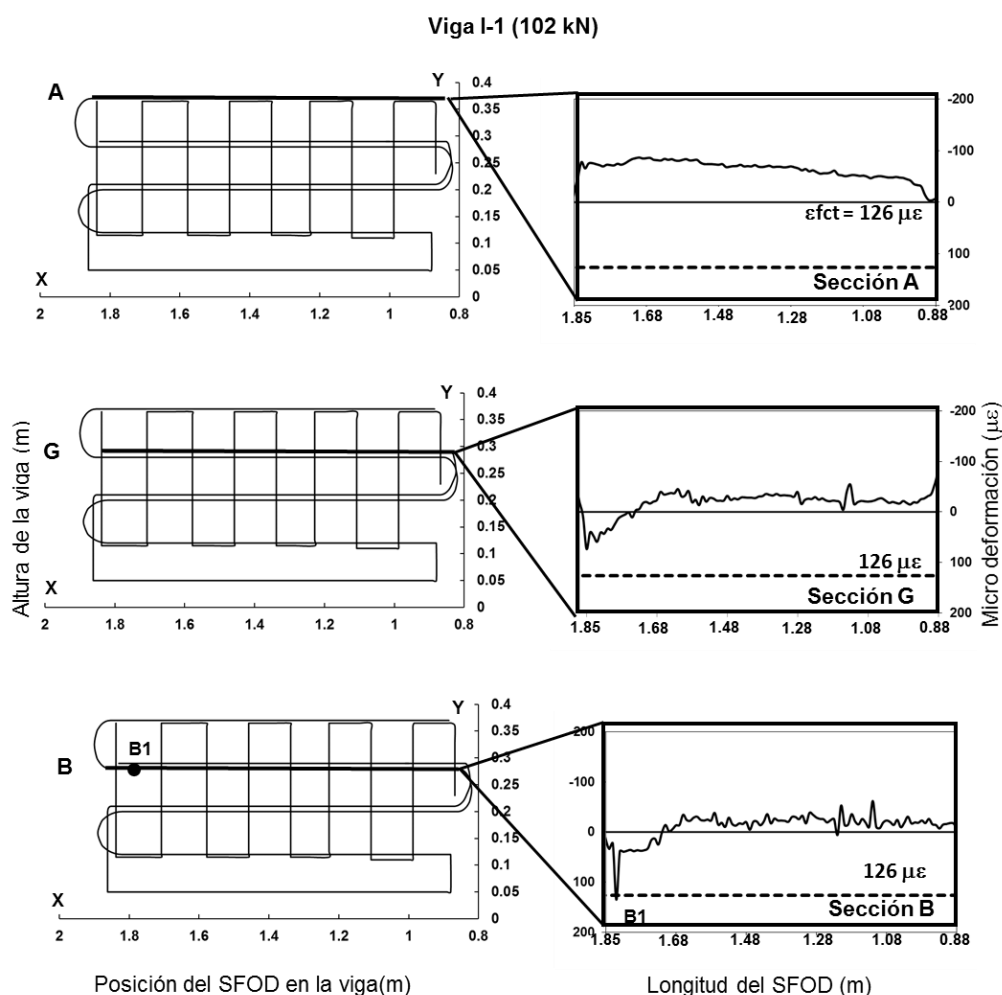


Fig. 6.33 Deformaciones en las secciones A, G y B del SFOD1 en la viga I-1(102 kN).

Viga I-1 (102 kN)

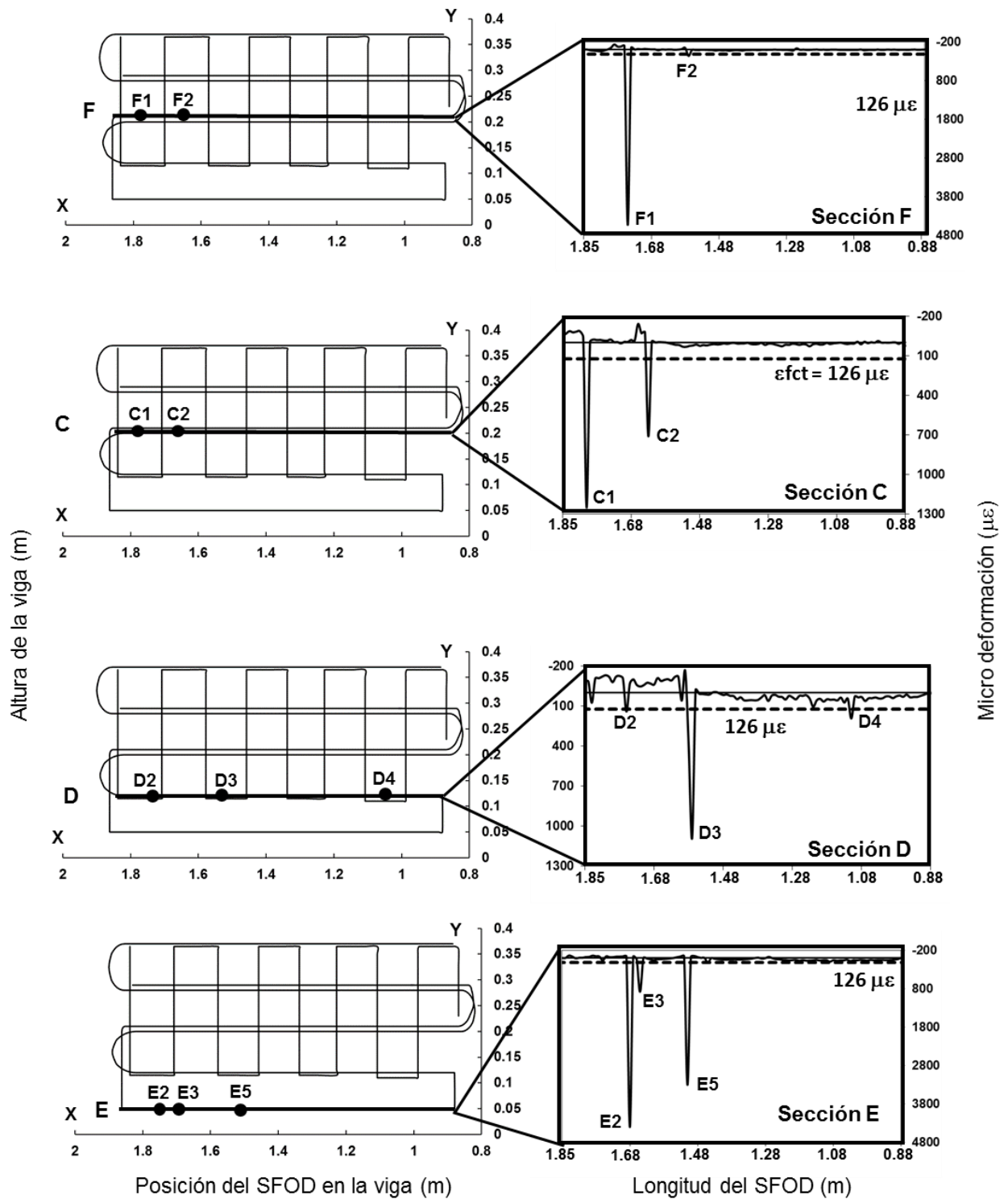


Fig. 6.34 Deformaciones en las secciones F, C, D y E del SFOD1 en la viga I-1(102 kN).

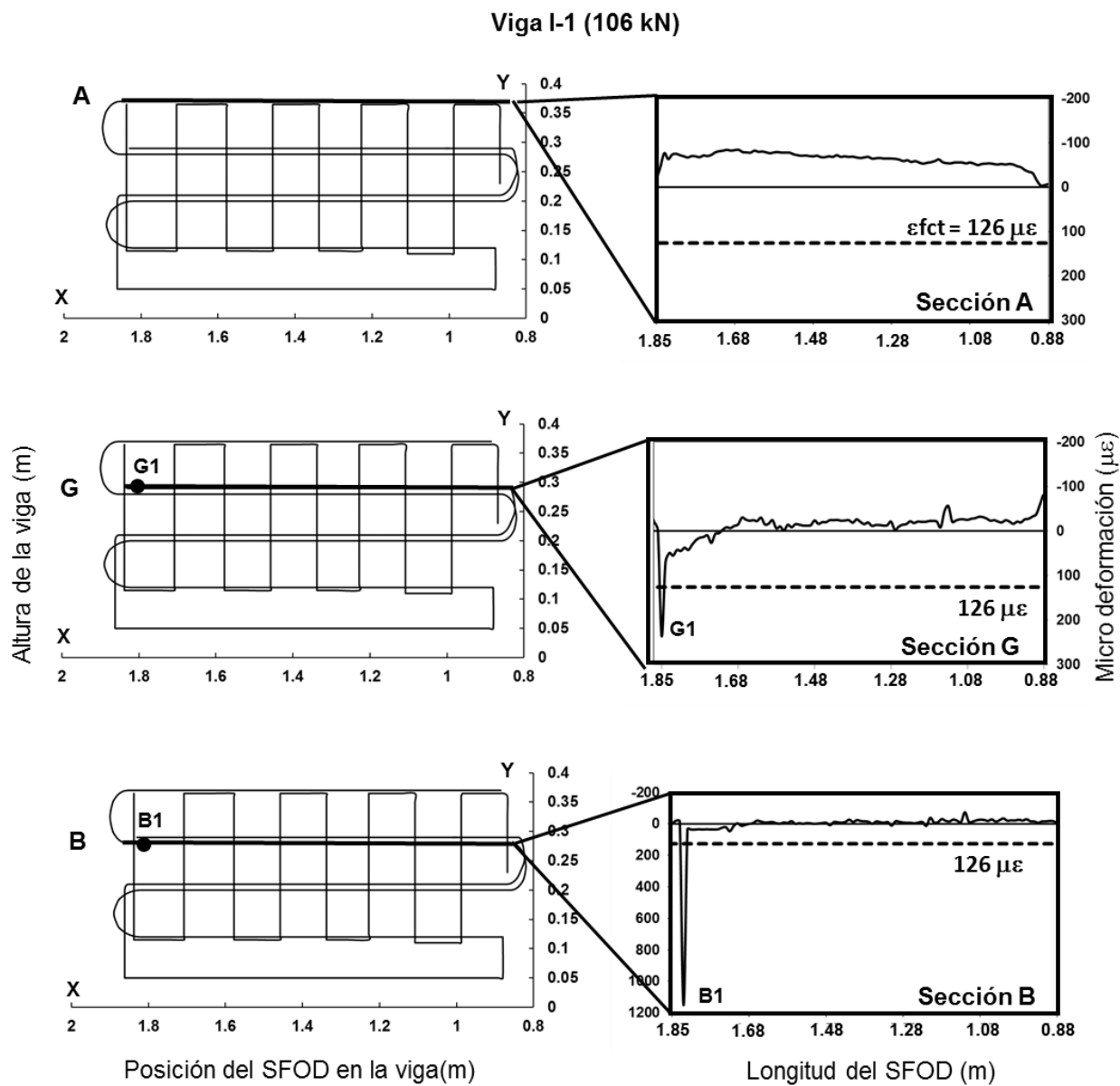


Fig. 6.35 Deformaciones en las secciones A,G y B del SFOD1 en la viga I-1(106 kN).

Viga I-1 (106 kN)

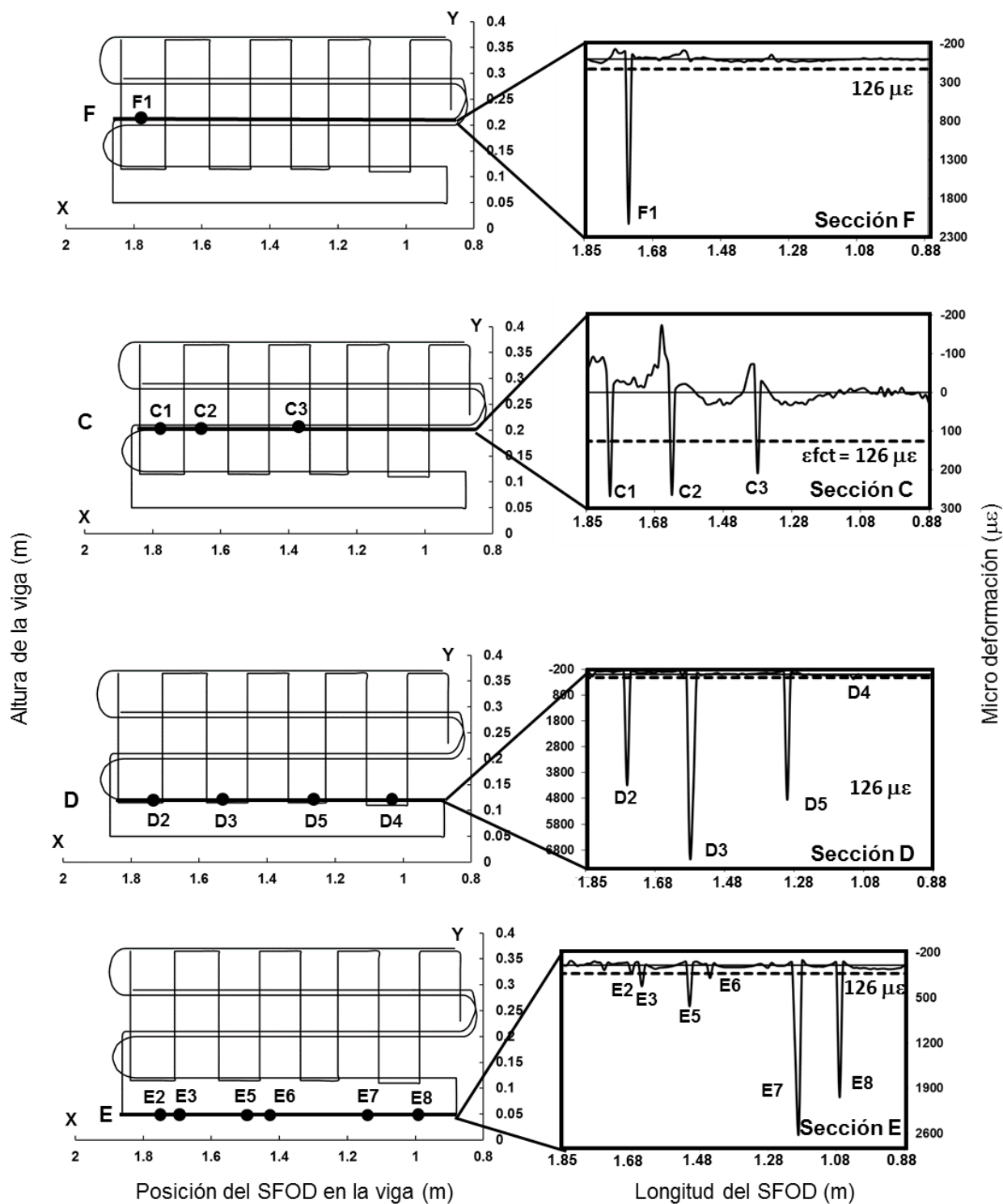


Fig. 6.36 Deformaciones en las secciones F, C, D y E del SFOD1 en la viga I-1(106 kN).

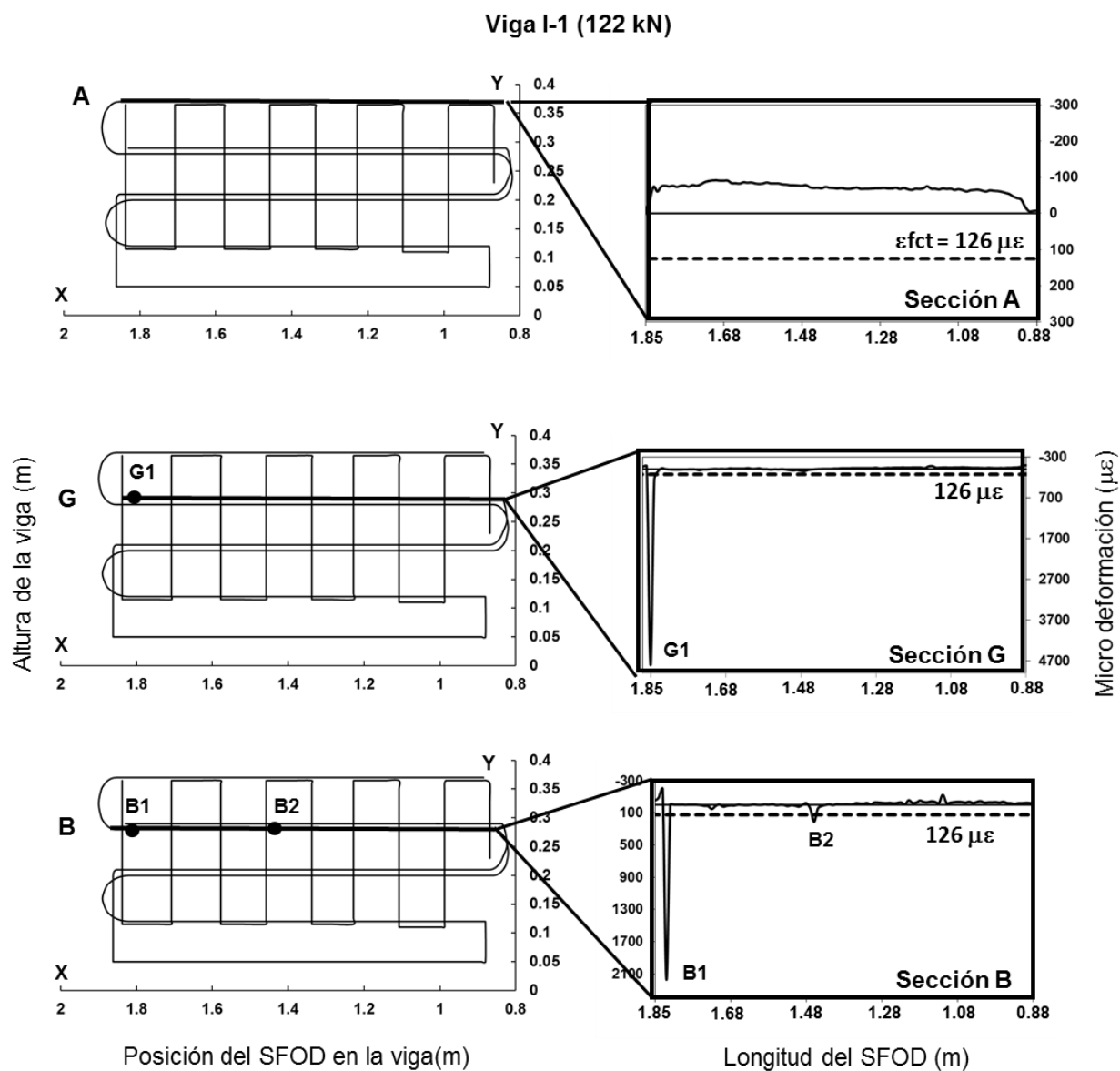


Fig. 6.37 Deformaciones en las secciones A, B y G del SFOD1 en la viga I-1(122 kN)

Viga I-1 (122 kN)

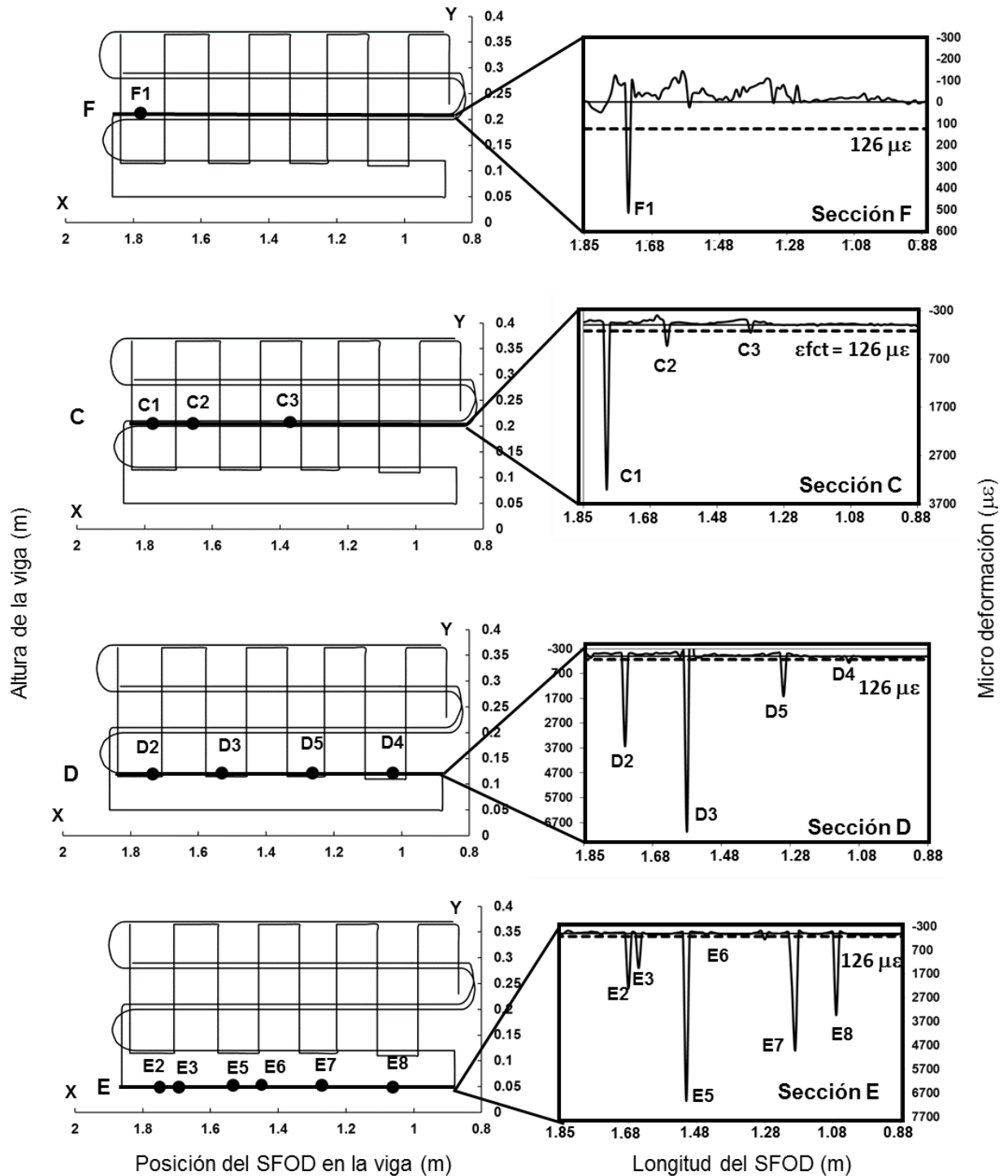


Fig. 6.38 Deformaciones en las secciones F, C, D y E del SFOD1 en la viga I-1(122 kN).

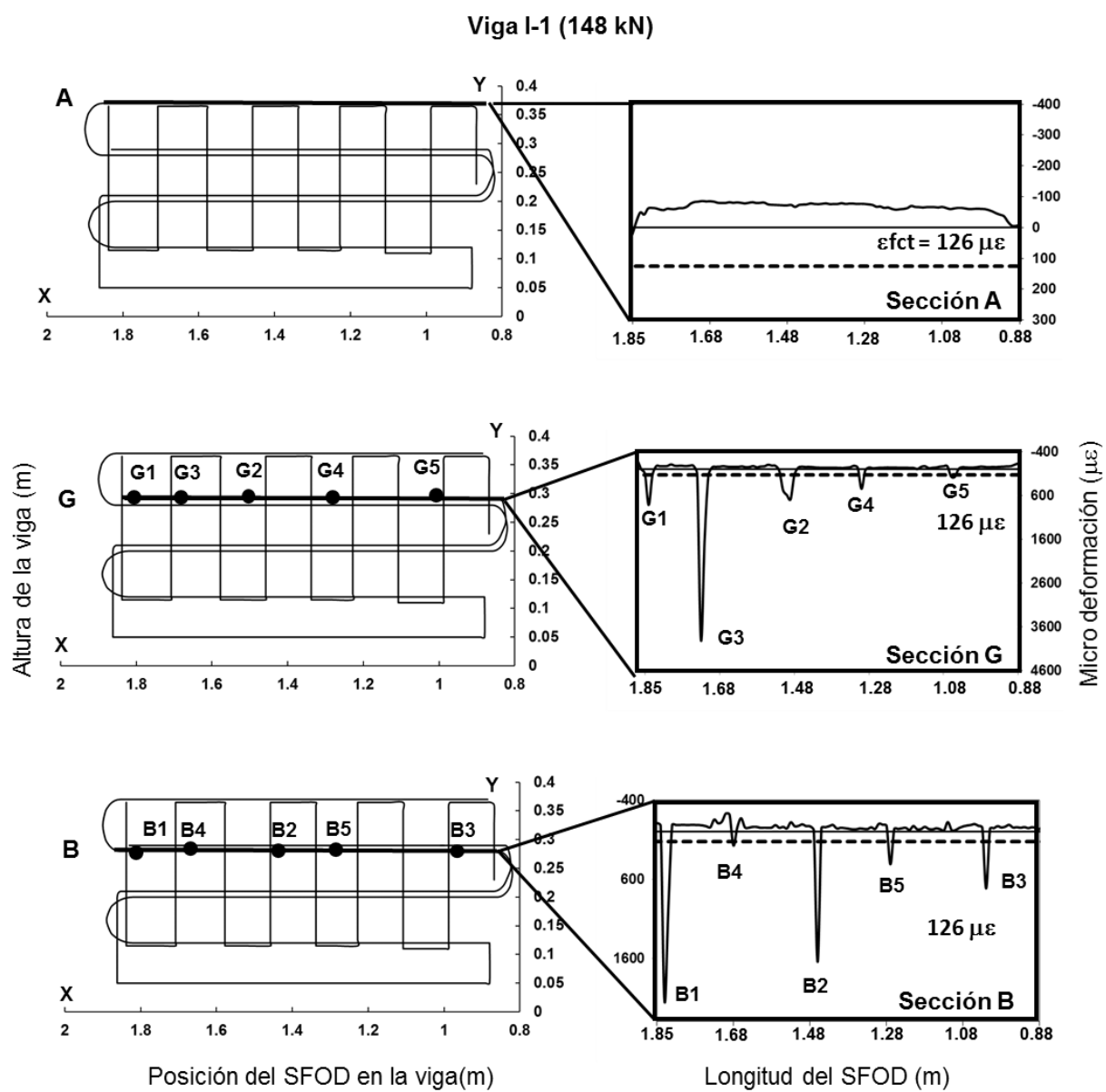


Fig. 6.39 Deformaciones en las secciones A, G y B del SFOD1 en la viga I-1(148 kN)

Viga I-1 (148 kN)

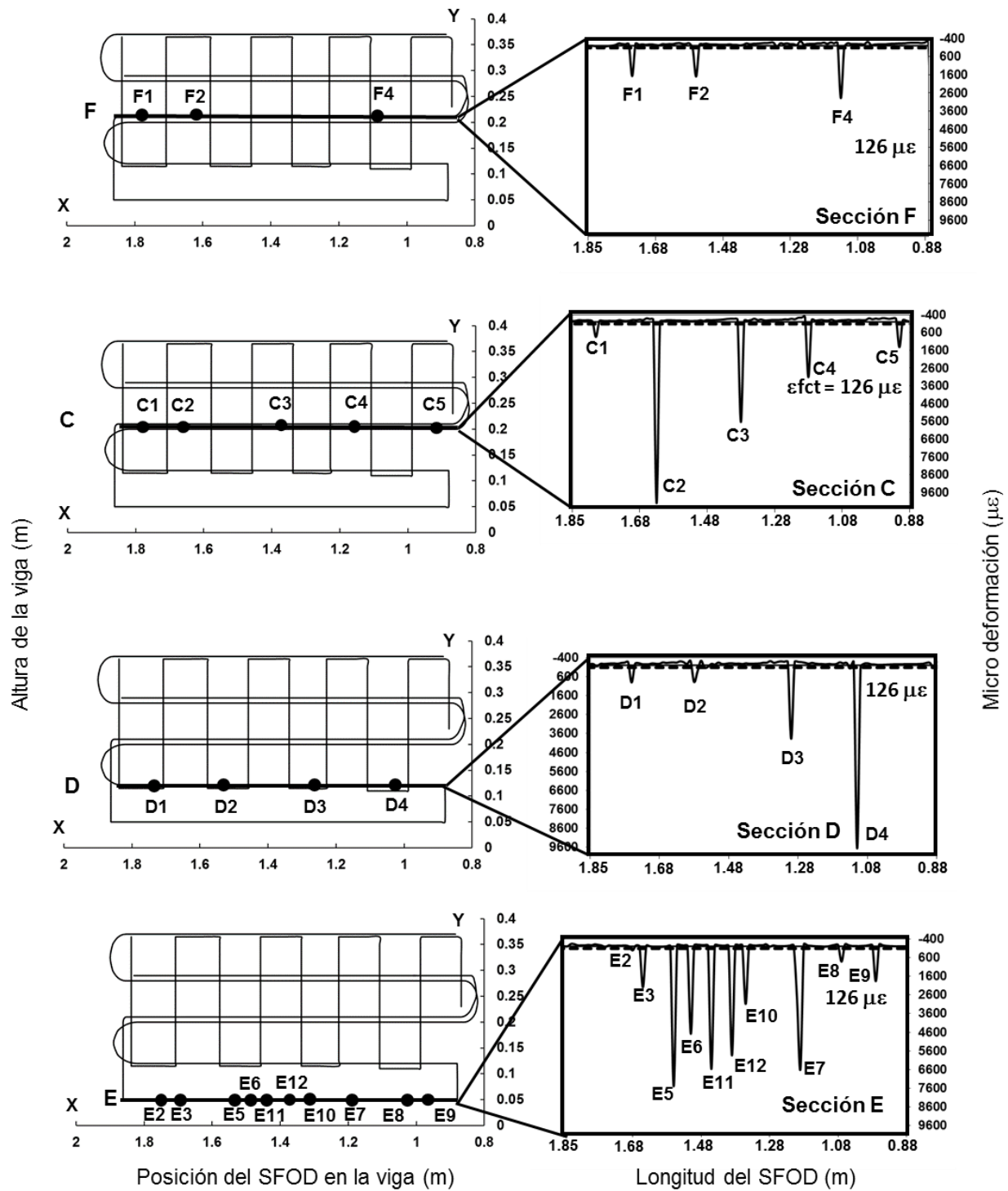


Fig. 6.40 Deformaciones en las secciones F, C, D y E del SFOD1 en la viga I-1(148 kN).

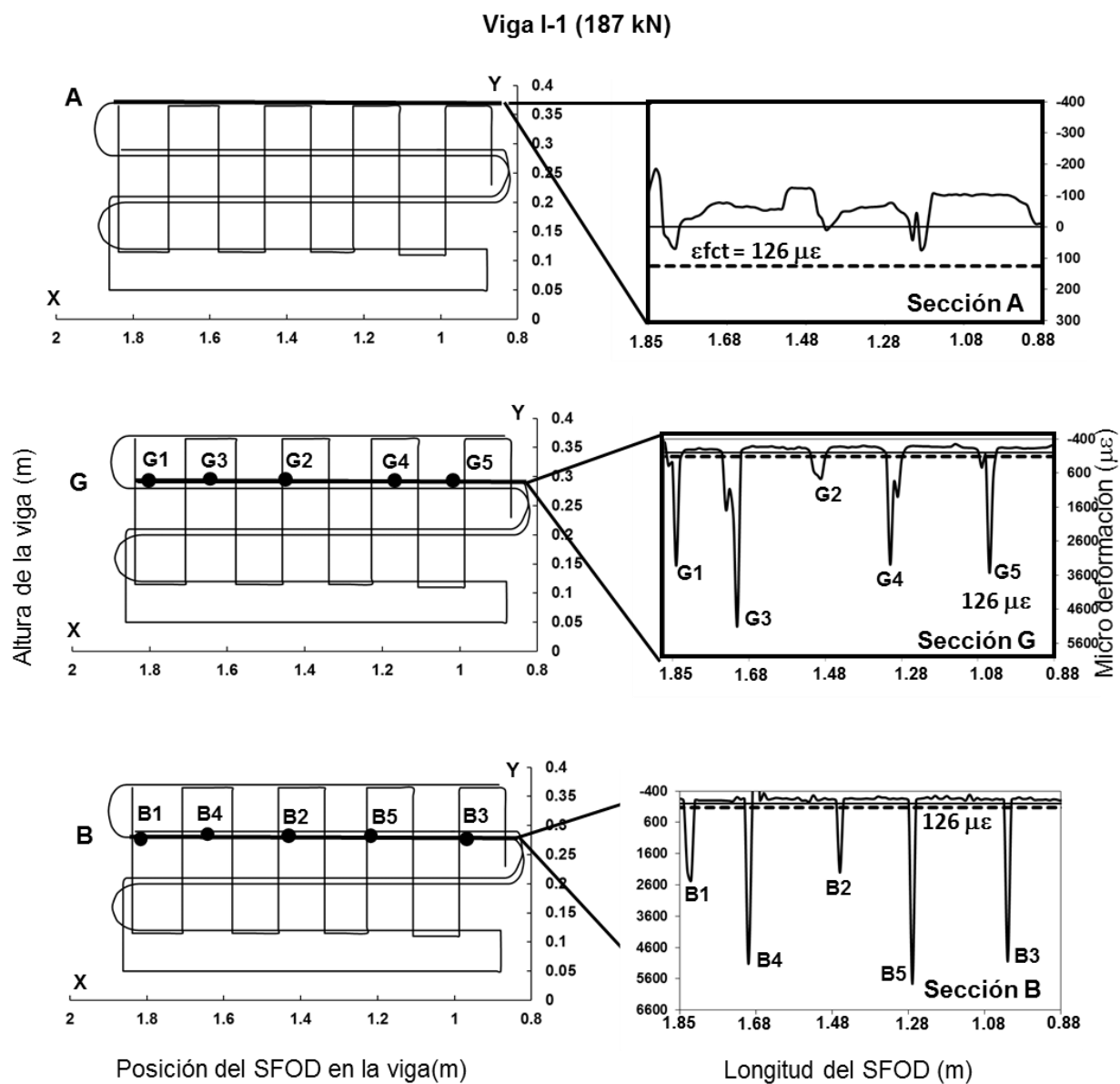


Fig. 6.41 Deformaciones en las secciones A, G y B del SFOD1 en la viga I-1(187 kN)

Viga I-1 (187 kN)

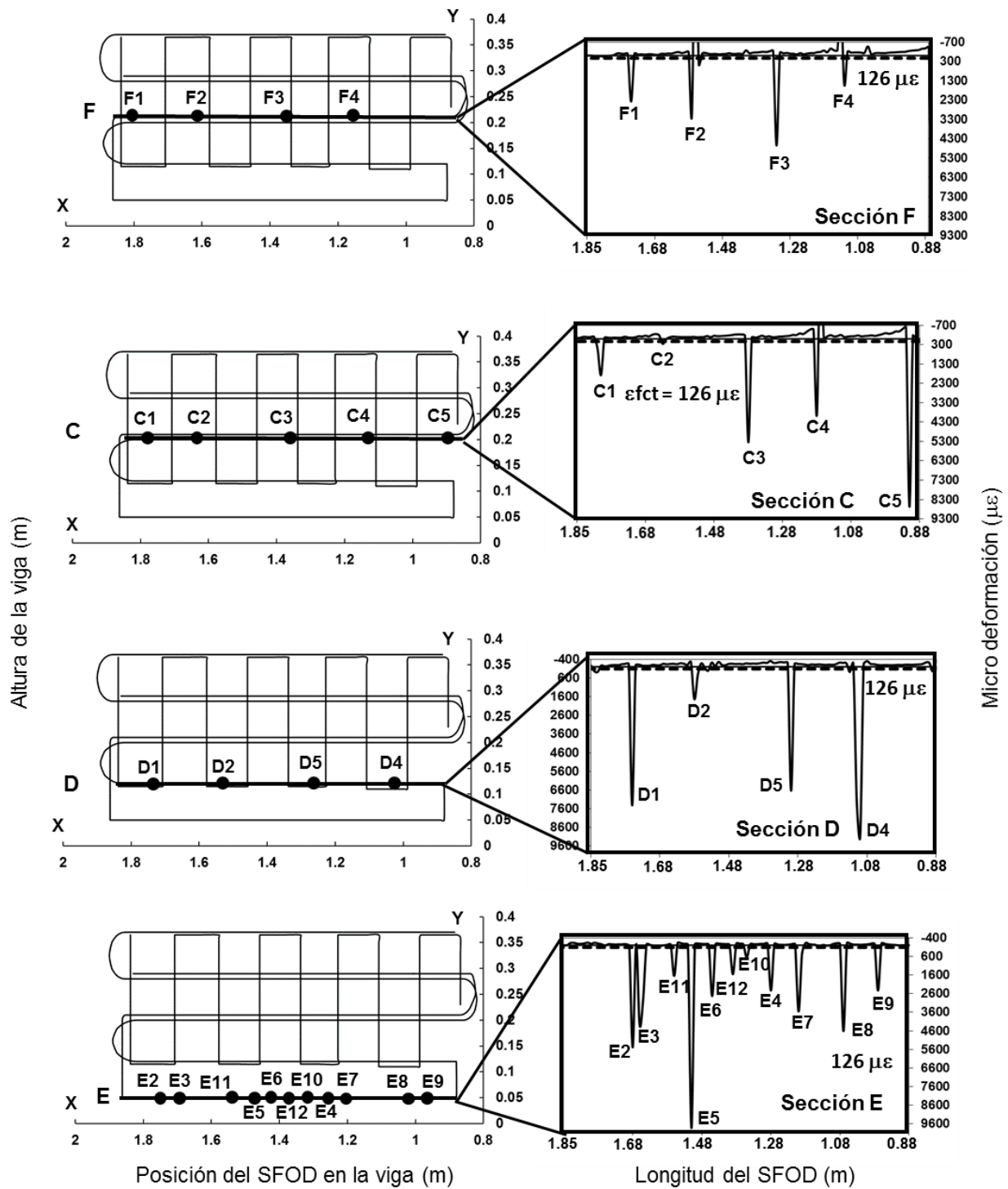


Fig. 6.42 Deformaciones en las secciones F, C, D y E del SFOD1 en la viga I-1(187 kN).

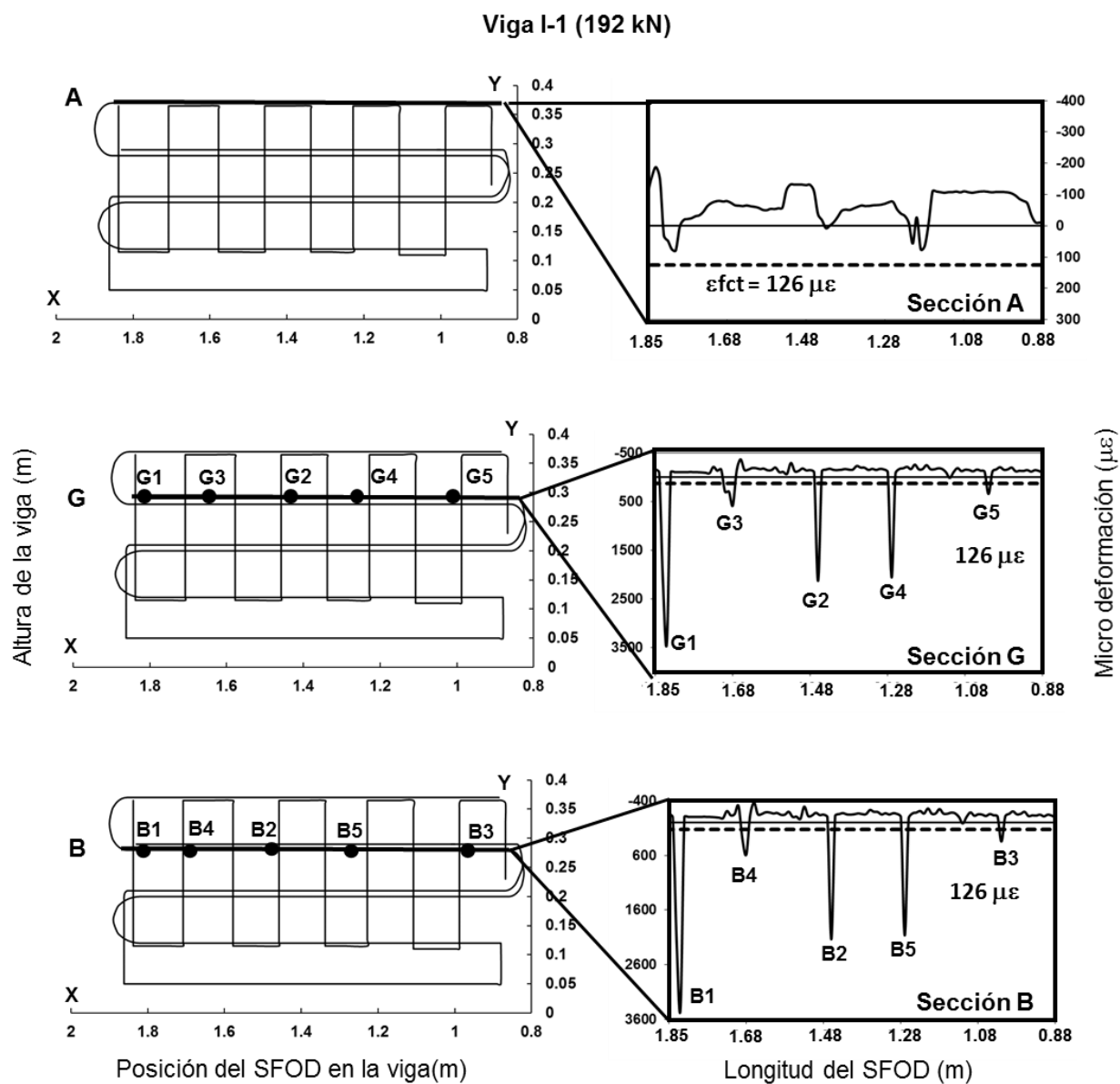


Fig. 6.43 Deformaciones en las secciones A, G y B del SFOD1 en la viga I-1(192 kN).

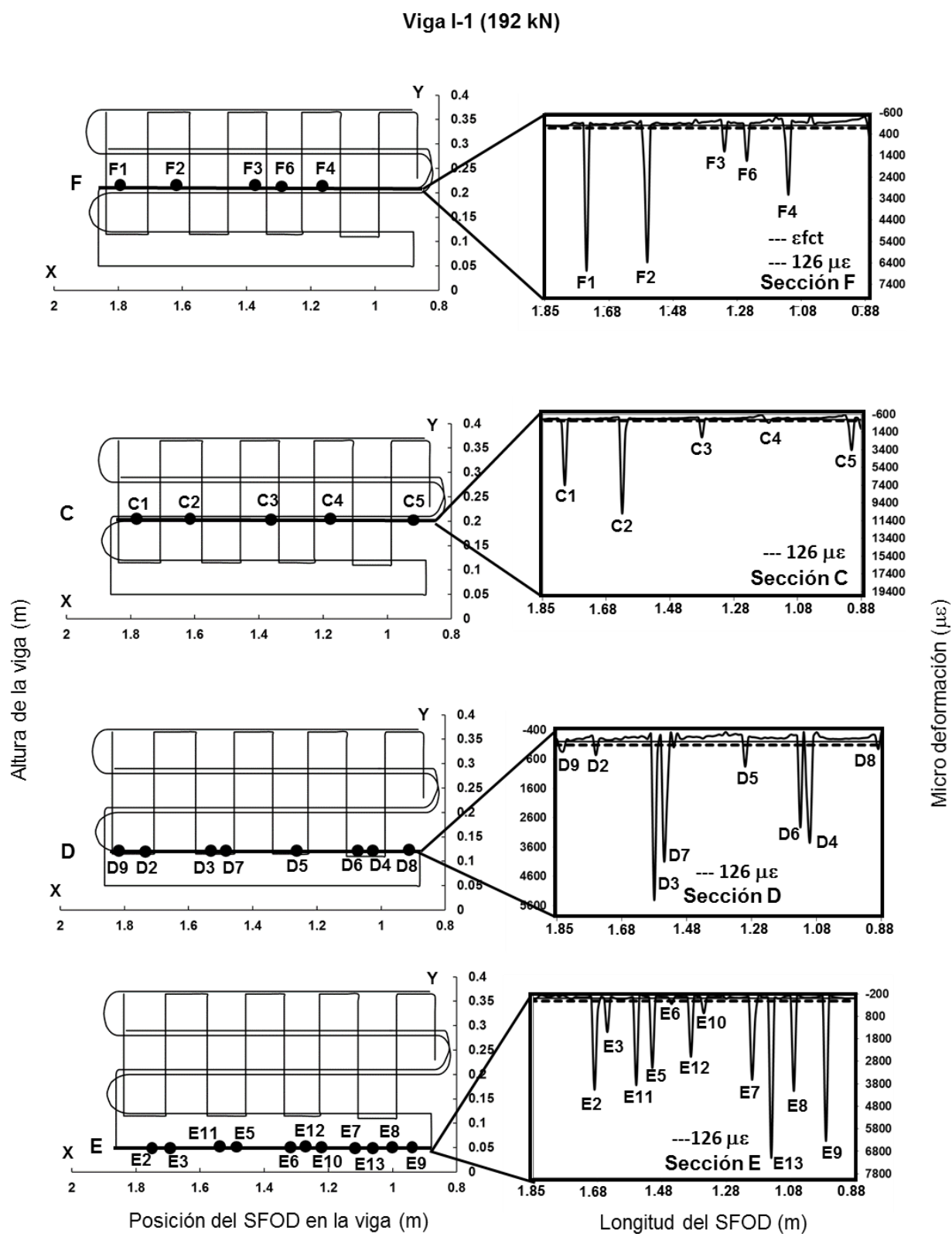


Fig. 6.44 Deformaciones en las secciones F, C, D y E del SFOD1 en la viga I-1(192 kN).

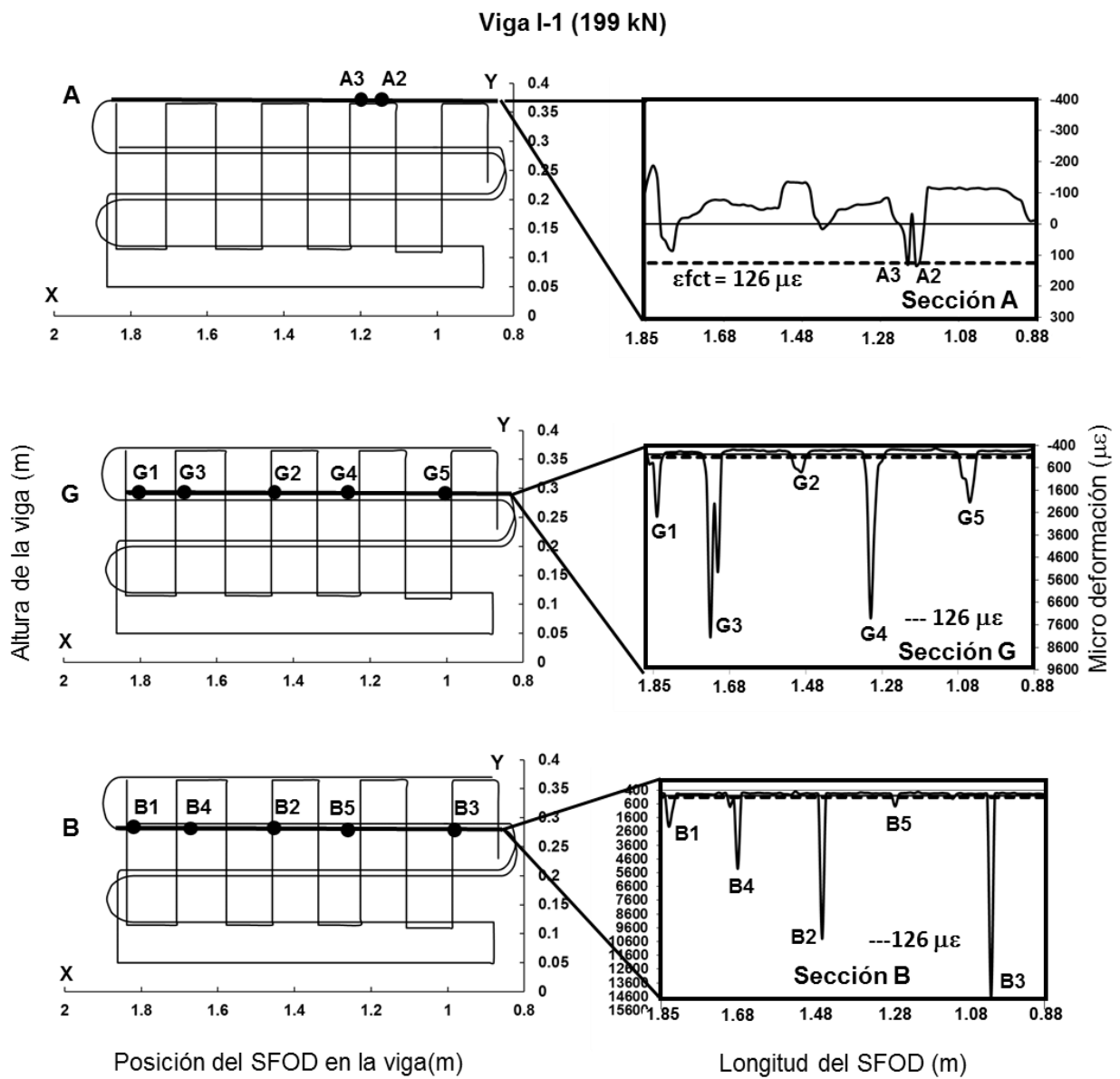


Fig. 6.45 Deformaciones en las secciones A, G y B del SFOD1 en la viga I-1(199 kN).

Viga I-1 (199 kN)

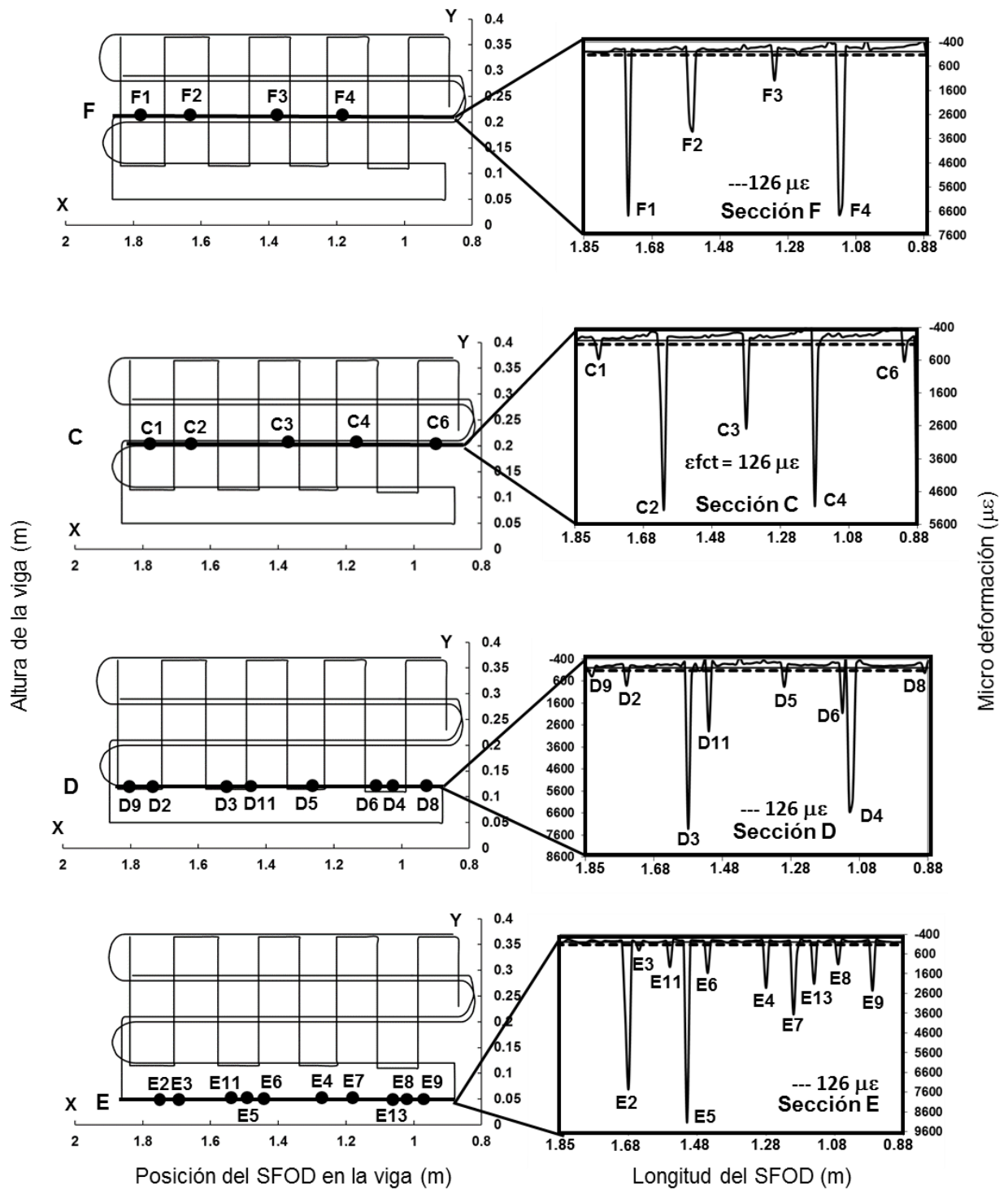


Fig. 6.46 Deformaciones en las secciones F, C, D y E del SFOD1 en la viga I-1(199 kN).

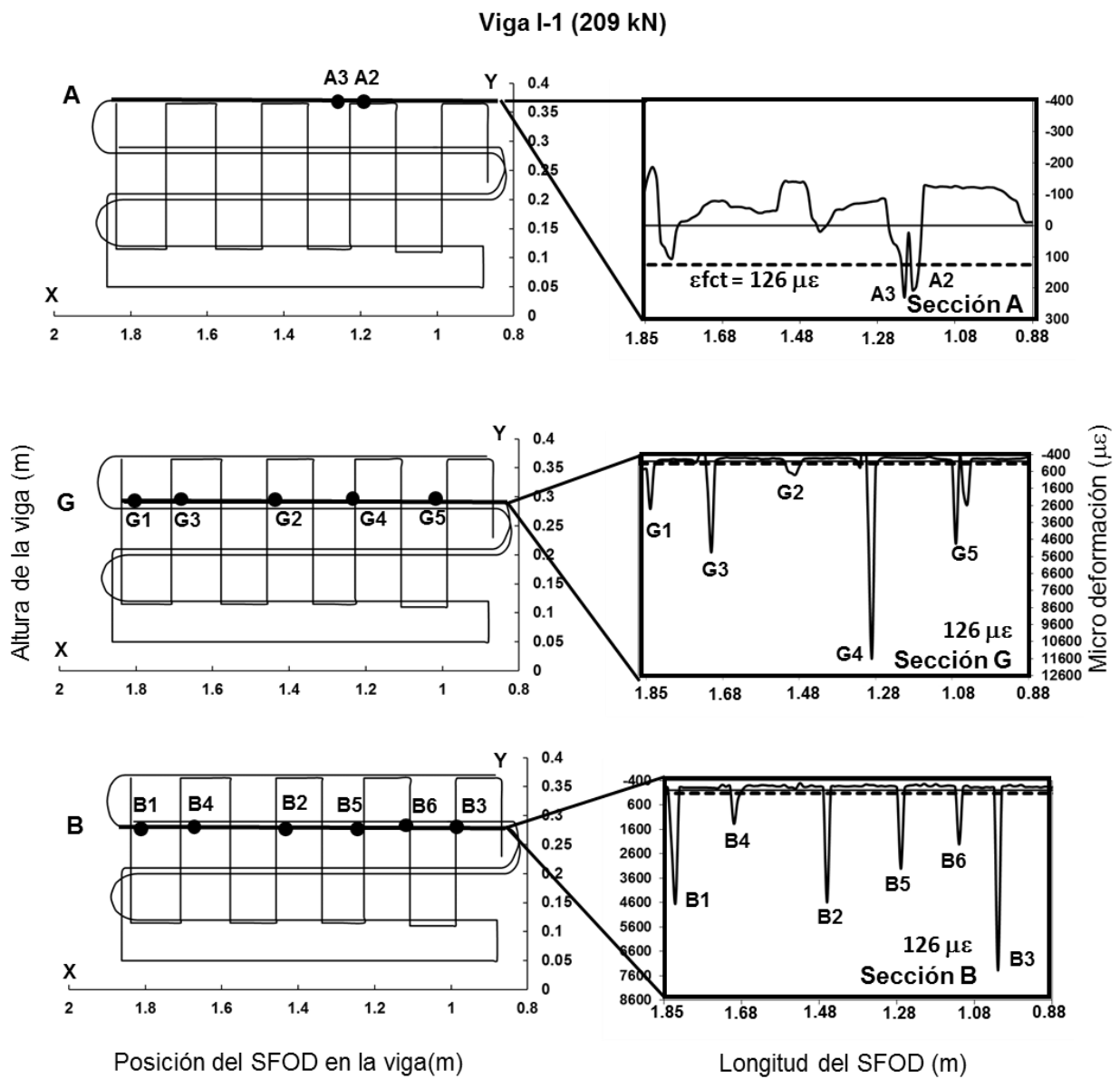


Fig. 6.47 Deformaciones en las secciones A, G y B del SFOD1 en la viga I-1(209 kN).

Viga I-1 (209 kN)

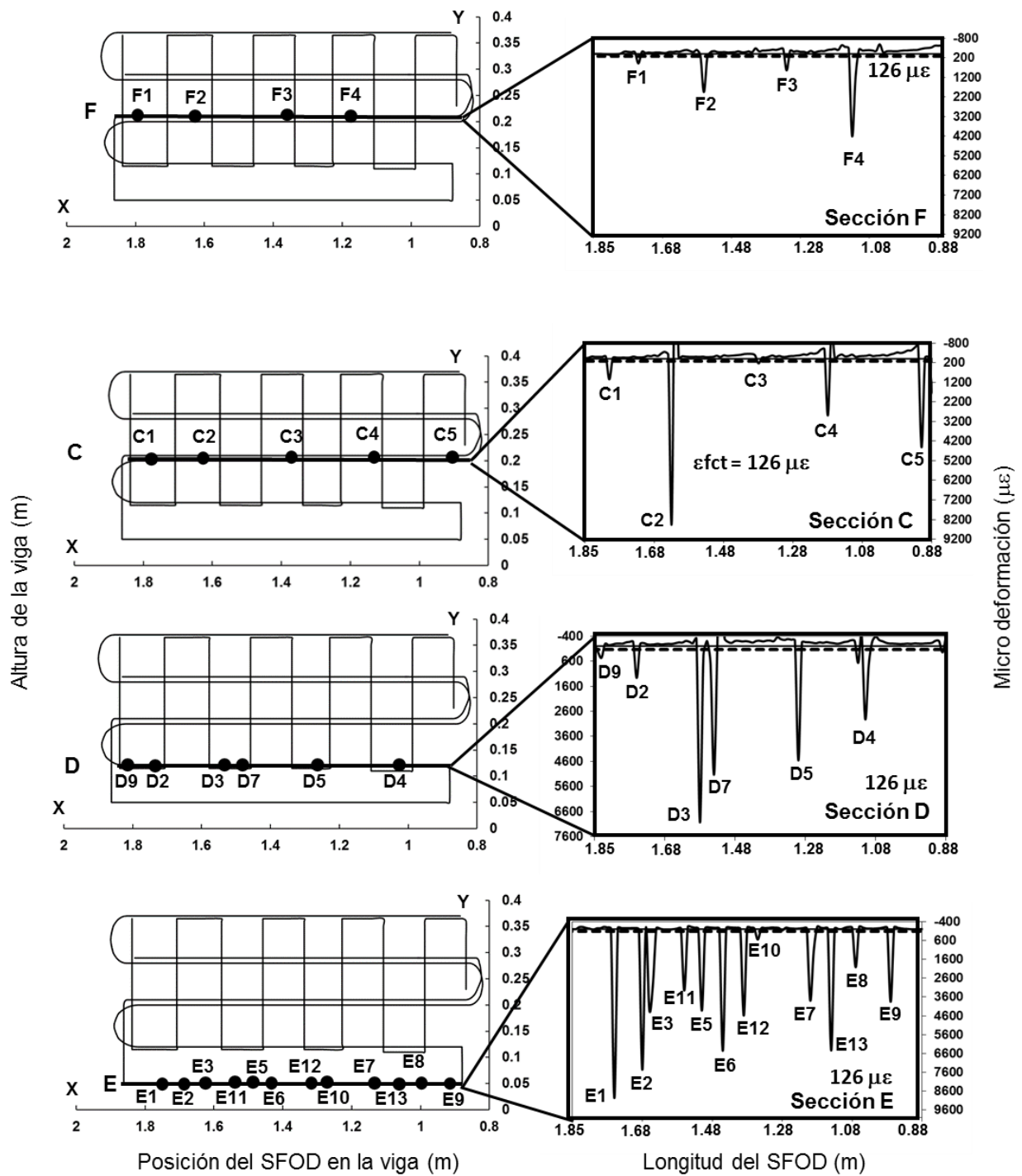


Fig. 6.48 Deformaciones en las secciones F, C, D y E del SFOD1 en la viga I-1(209 kN).

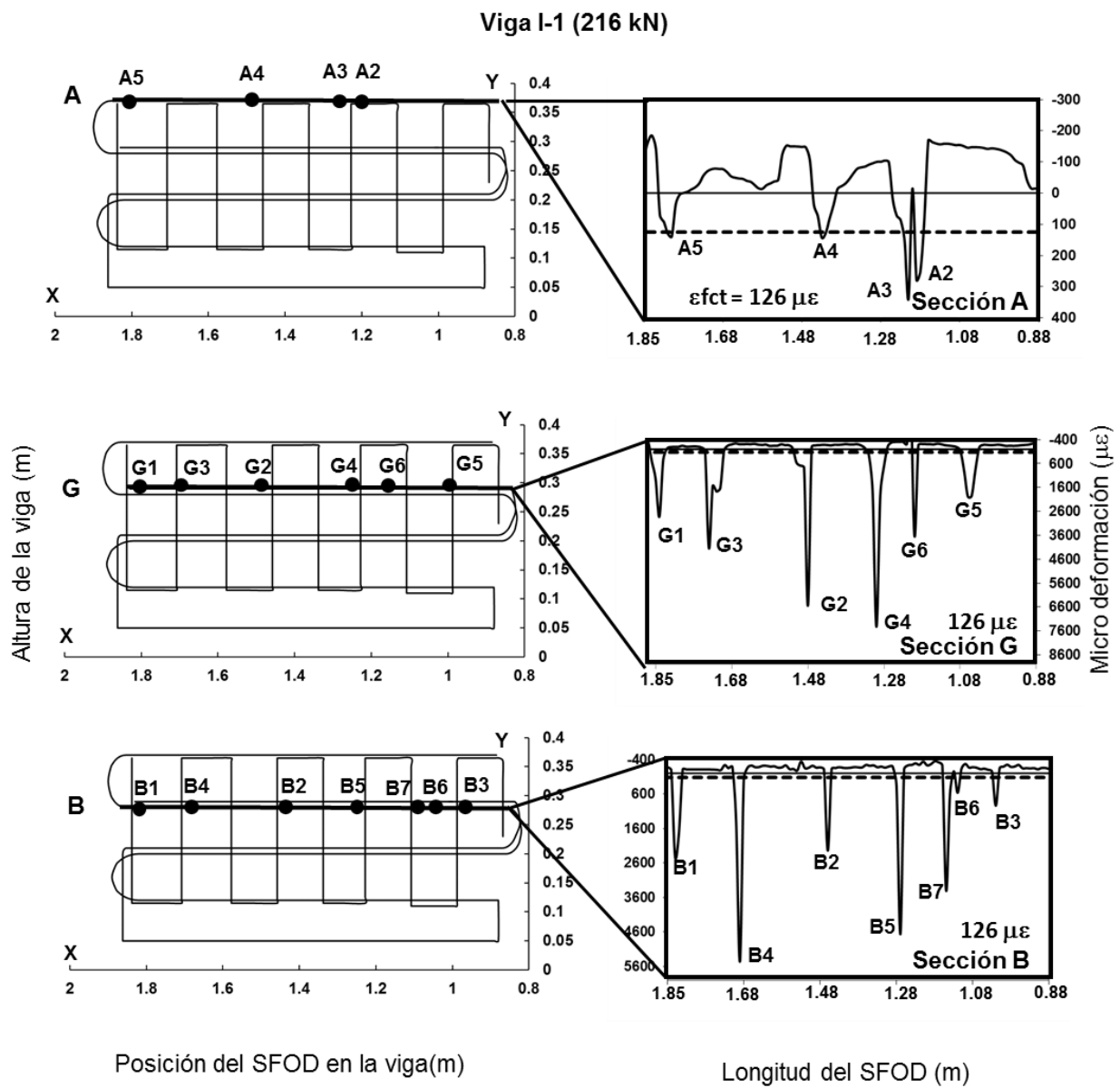


Fig. 6.49 Deformaciones en las secciones A, G y B del SFOD1 en la viga I-1(216 kN).

Viga I-1 (216 kN)

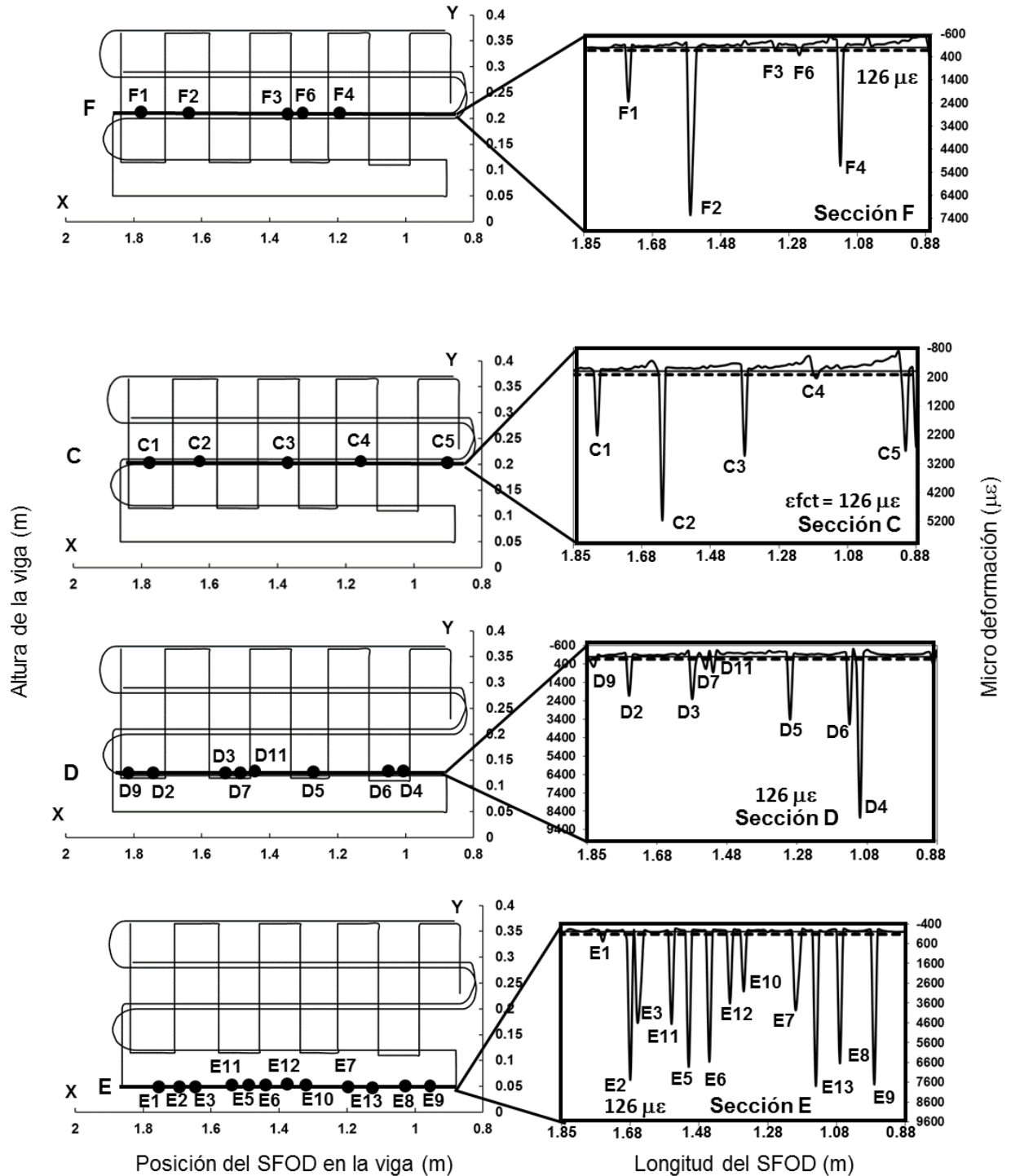


Fig. 6.50 Deformaciones en las secciones F, C, D y E del SFOD1 en la viga I-1(216 kN).

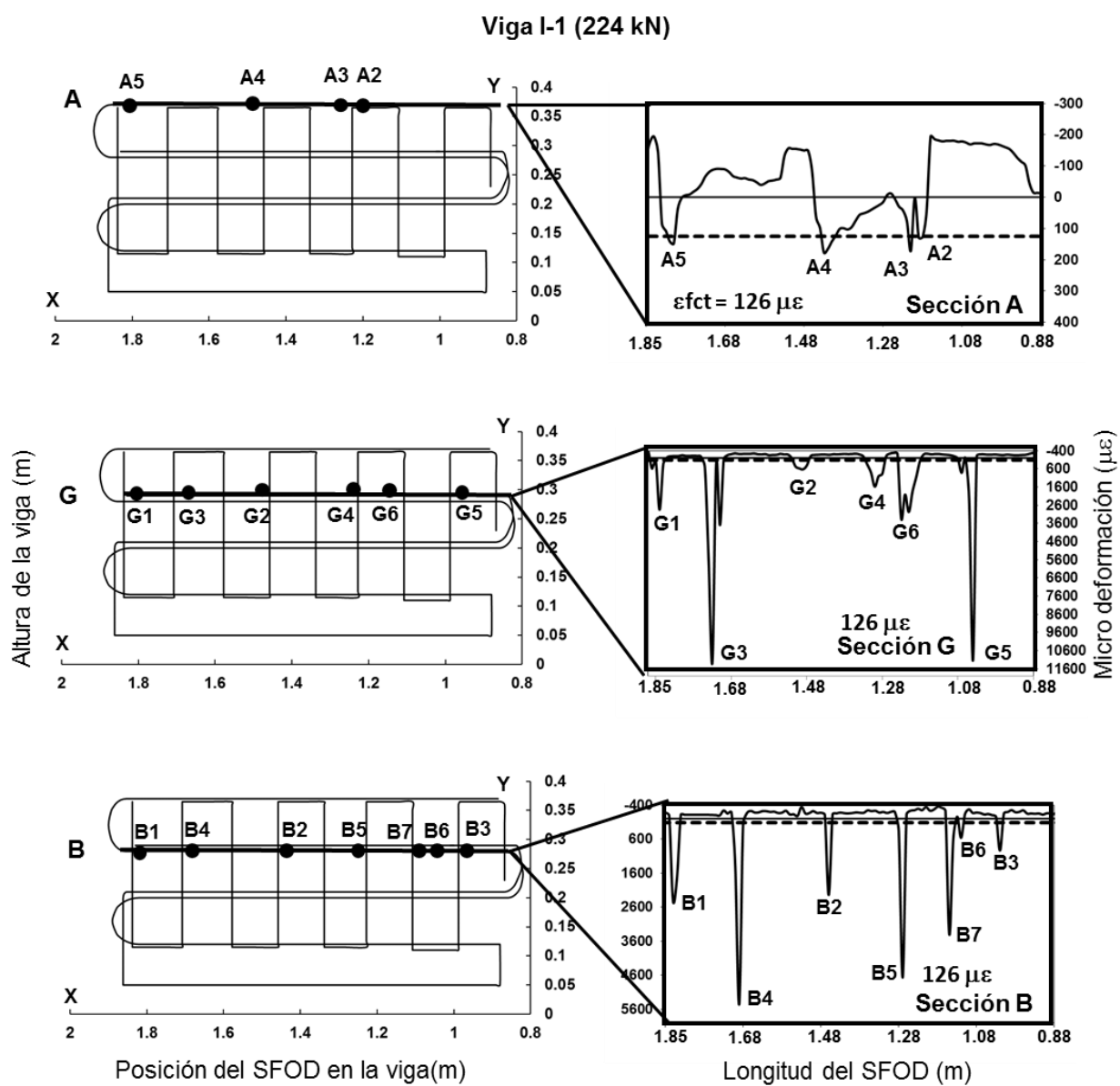


Fig. 6.51 Deformaciones en las secciones A, G y B del SFOD1 en la viga I-1(224 kN).

Viga I-1 (224 kN)

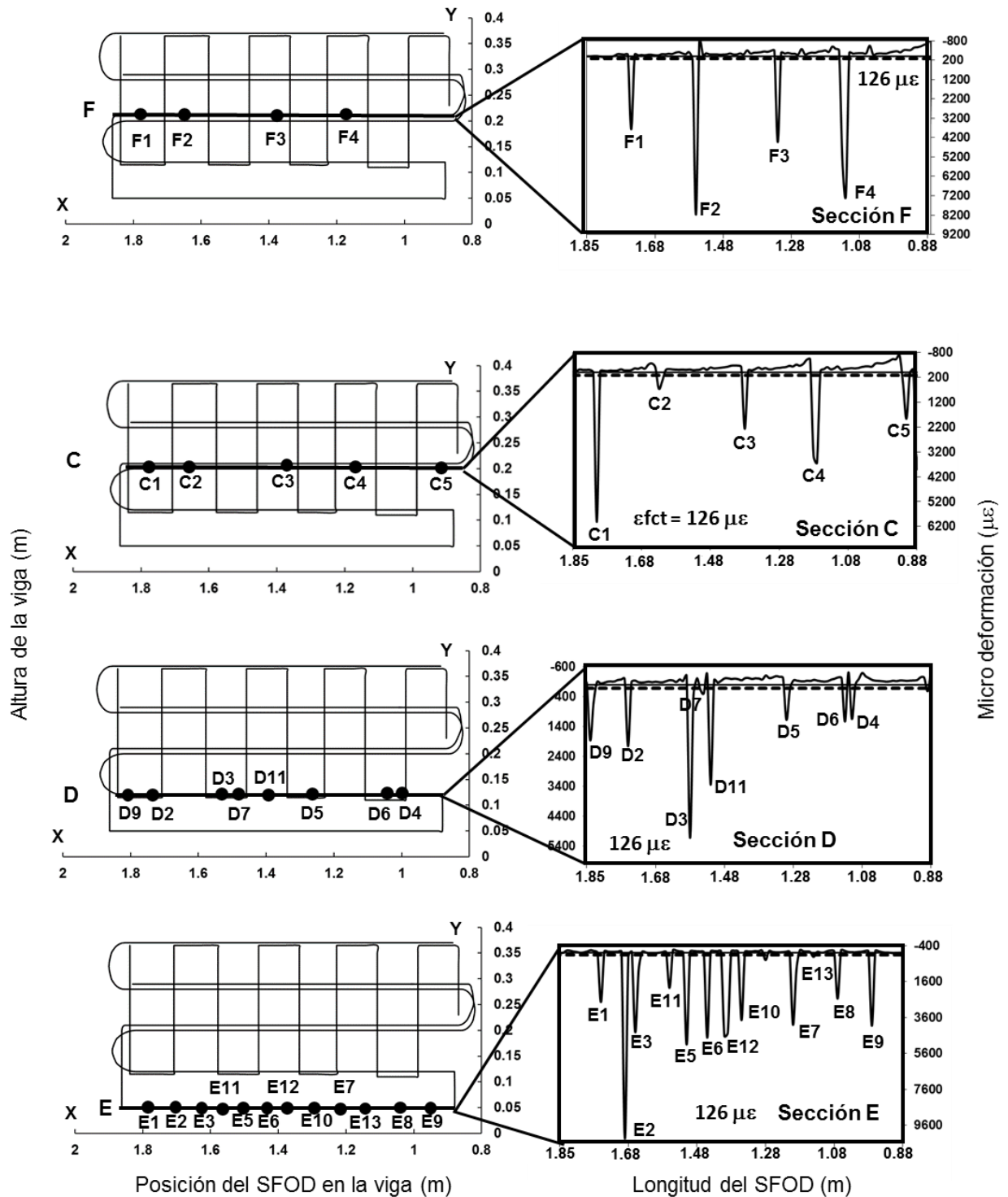


Fig. 6.52 Deformaciones en las secciones F, C, D y E del SFOD1 en la viga I-1(224 kN).

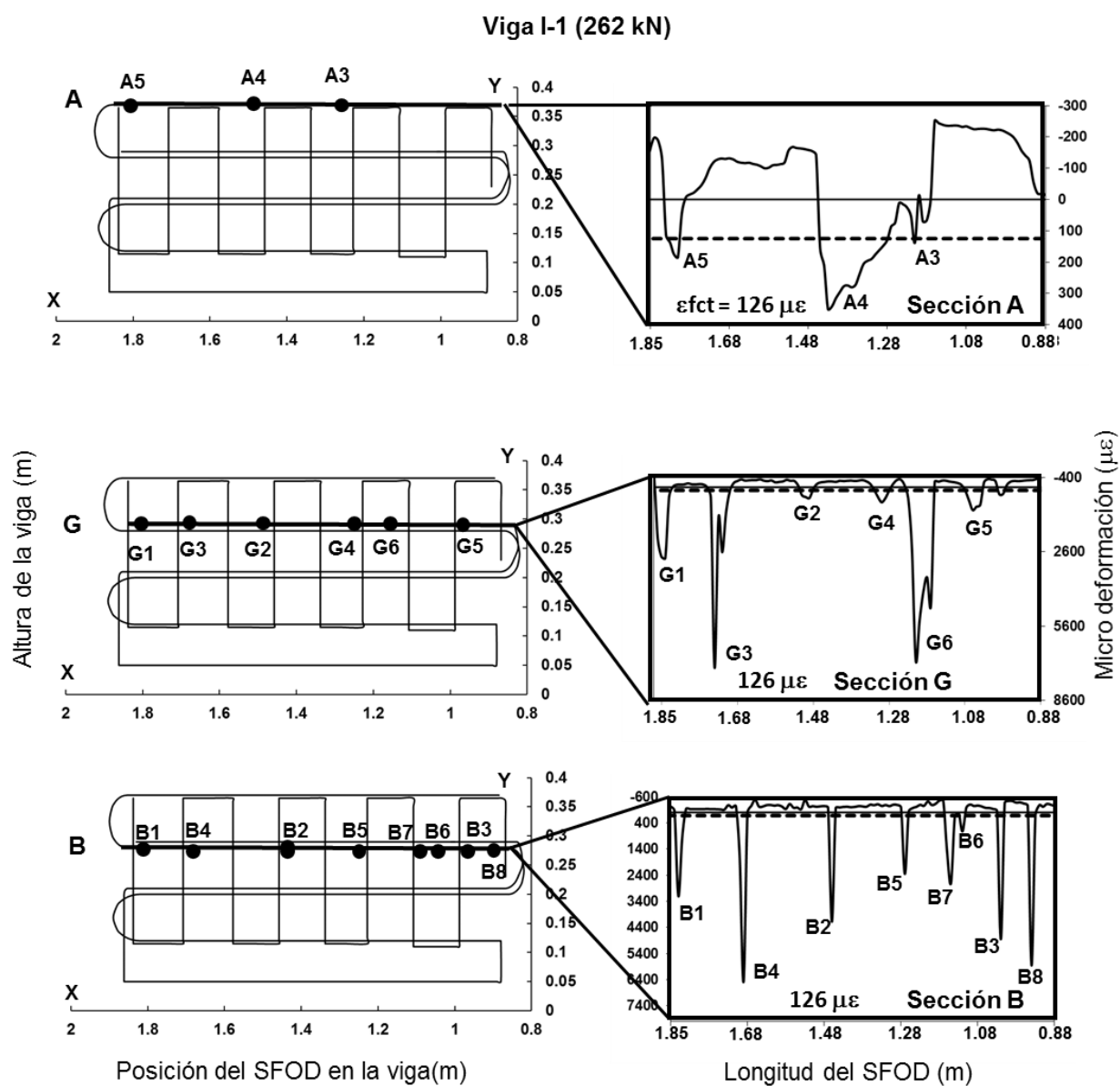


Fig. 6.53 Deformaciones en las secciones A, G y B del SFOD1 en la viga I-1(262 kN).

Viga I-1 (262 kN)

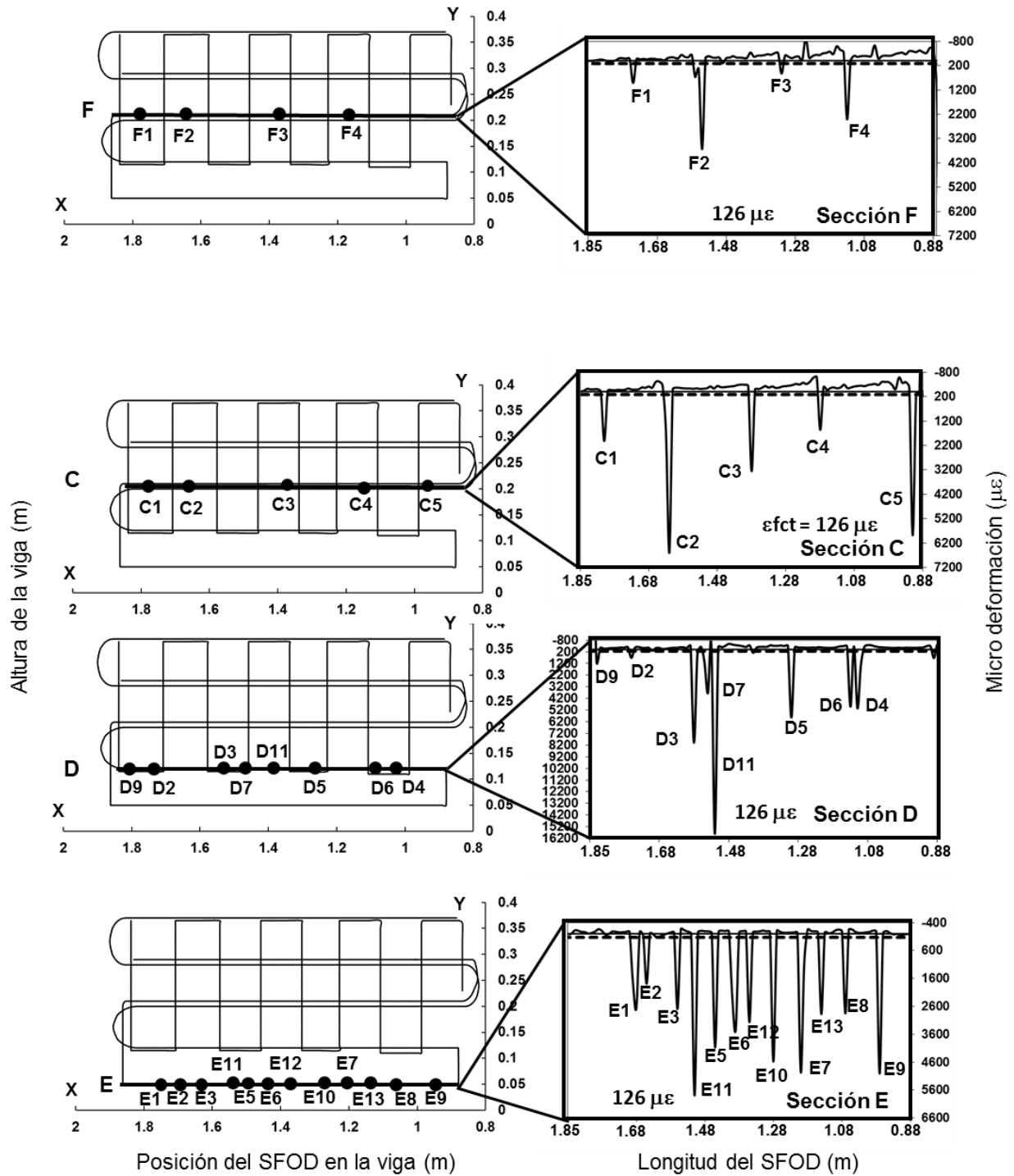


Fig. 6.54 Deformaciones en las secciones F, C, D y E del SFOD1 en la viga I-1(262 kN).

A partir del conjunto de gráficas anterior (Figs. 6.21 a 6.54) se tiene una descripción sumamente detallada de la evolución del estado de las deformaciones, desde la primera fisura detectada por el SFOD1 a los 47 kN hasta un nivel de carga de 262 kN después del cual, los puntos de fisuración detectados por el sistema OBR, comienzan a presentar valores de deformación poco confiables. A su vez, y para fines cuantitativos, se tiene el valor de la deformación pico en los puntos de fisuración. En la Tabla A.9 del anexo A se resumen estos valores máximos de deformación en cada uno de los puntos de fisuración detectados en la viga I-1, para los distintos niveles de carga presentados anteriormente.

Para el caso de la viga I-1, la Tabla A.9 solamente comprenden los valores máximos de deformación para las secciones A, G, B, F, C y D en dirección horizontal. No se incluyen las deformaciones máximas asociadas a los puntos de fisuración localizados en la sección E del SFOD1. Ello se debe a que, posteriormente, estos valores serán la referencia para calcular los anchos de fisura promedio que se presentan en el alma de la viga, sin incluir el ala o patín de la viga, que es donde se ubicó la sección E.

En esta tabla se presentan en forma progresiva los valores de deformación máximos conforme se fueron detectando cada uno de ellos. Por esta razón la Tabla A.9 presenta espacios en blanco, lo cual se interpreta como un valor en el cual aún la deformación no era superior a la deformación por tracción máxima.

6.2.4.2 Viga I-2

El análisis de la distribución de deformaciones en la viga I-2 se realizó con un solo SFOD y en dos direcciones perpendiculares. De esta forma se obtuvieron simultáneamente, tanto las distribuciones de deformación en dirección horizontal como vertical.

En las Figs. 6.55 y 6.56 se muestran la distribución de las deformaciones en las secciones A, B, C y D, y en las secciones 1 a 10 respectivamente. En la viga I-2 la deformación máxima a tracción (ϵ_{fct}) de acuerdo a la Tabla 5.2 del capítulo 5, fue de 152 $\mu\epsilon$, lo cual se indica en ambas gráficas con una línea punteada.

Las Figs. 6.55 y 6.56 muestran la distribución de las deformaciones para una carga de 68 kN en las diferentes secciones que conformaron el SFOD1. Bajo este nivel de carga se localizó en la sección D, el primer punto de fisuración denominado D1, el cual se identifica en la Fig. 6.55.

Se puede observar que el nivel de deformación que presenta el punto D1, apenas sobrepasa la línea punteada, lo cual indica un nivel de fisuración que en ocasiones puede ser imperceptible para la vista. Esta limitación es cubierta gracias a la sensibilidad del sistema OBR, el cual es capaz de detectar puntos de fisuración desde el inicio de su aparición y antes de que sean perceptibles por inspección visual. Este aspecto resulta fundamental en un sistema de MSE.

En las demás secciones horizontales del SFOD1, los niveles de deformación presentan valores bajos. La Fig. 6.55 indica que la sección A se encuentra en compresión, y con valores de deformación ascendentes con respecto al punto de aplicación de la carga durante el ensayo. La sección B también muestra deformaciones en compresión pero con valores muy cercanos a cero, y con un incremento en compresión cercano al punto de aplicación de carga. A su vez, la sección C indica valores muy próximos a cero, lo que puede relacionarse con su proximidad respecto al eje neutro de la sección transversal de la viga. En la sección C, también se aprecia una tendencia al incremento de deformaciones en función de su proximidad con el punto de aplicación de la carga, pero a diferencia de la sección B, en este caso el incremento de deformación se produce en tracción con un valor cercano a las 50 $\mu\epsilon$. Con relación a la distribución de deformaciones que se presentan en cada una de las secciones verticales del SFOD1. En la Fig. 6.56 se observa que en ningún caso se presentan valores de deformación superiores a las 152 $\mu\epsilon$. En general, todas las secciones presentan valores por debajo o próximos a las 50 $\mu\epsilon$, lo que indica que aún en dirección vertical los niveles de deformación no son importantes.

Viga I-2 (68 kN)

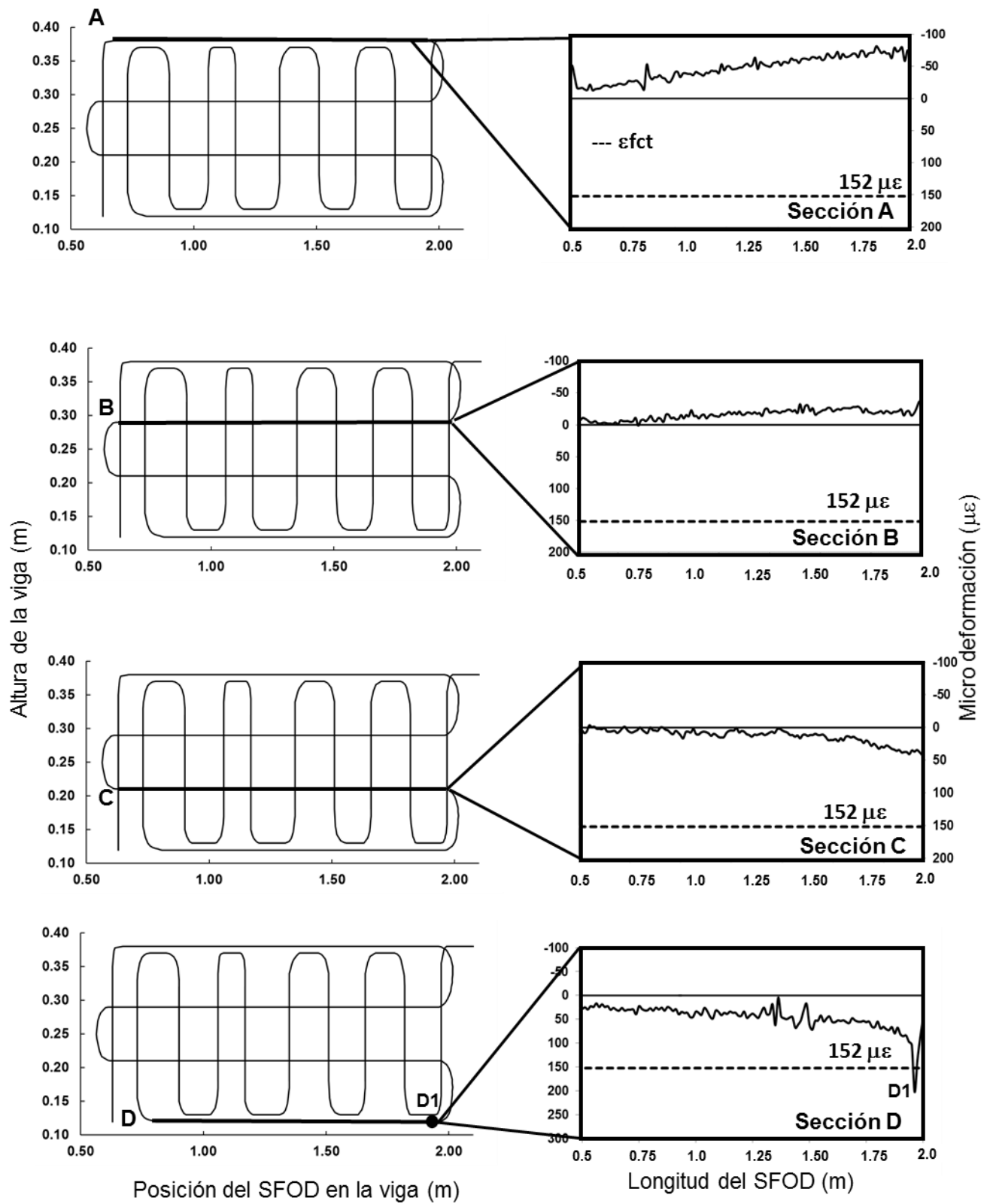


Fig 6.55 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-2(68 kN).

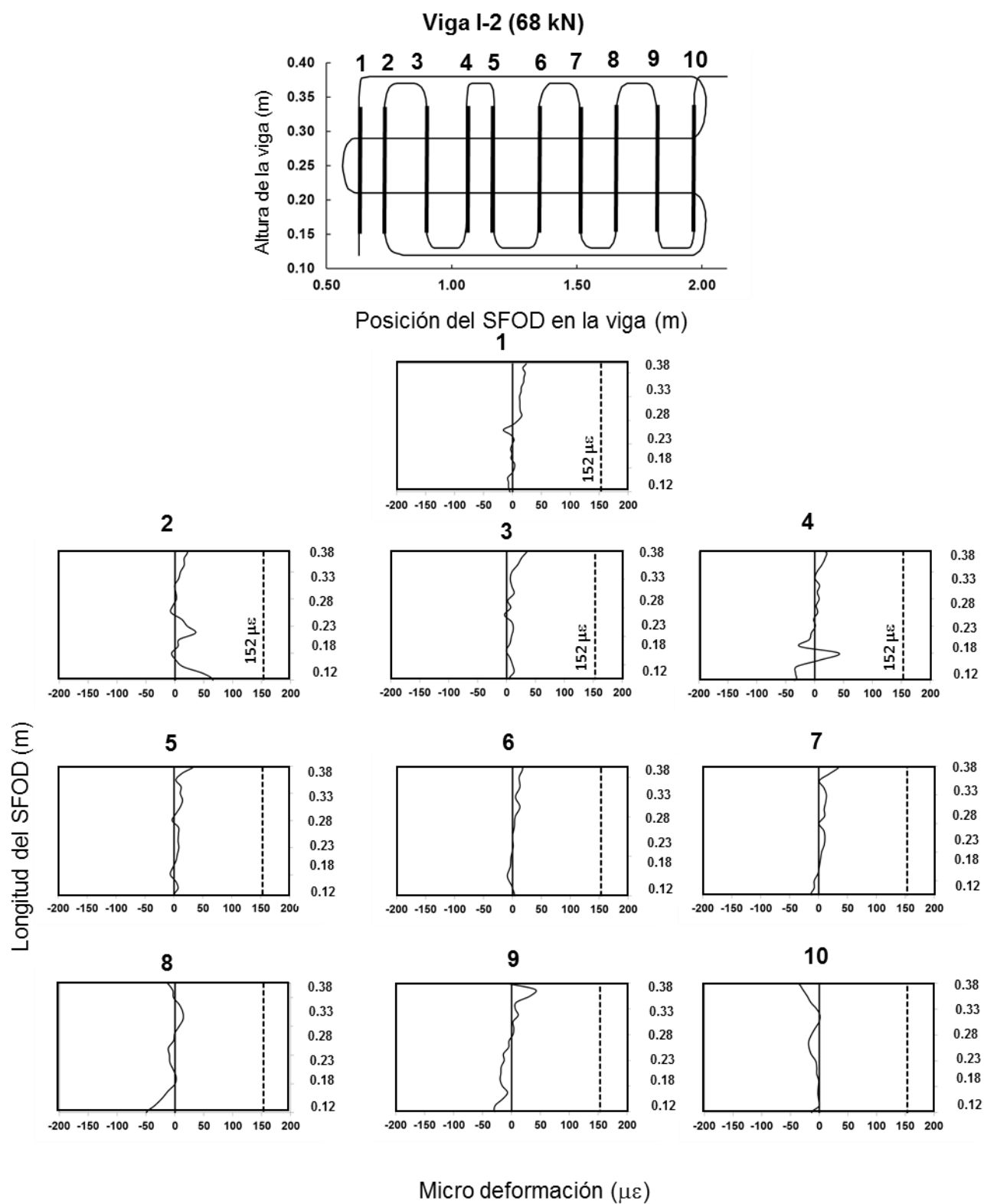


Fig. 6.56 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-2(68 kN).

Posteriormente en las Figs. 6.57 a 6.64 se muestra la distribución de deformaciones tanto en las secciones horizontales como verticales del SFOD1 en la viga I-2. Estas figuras comprenden niveles de carga entre los 76 y 100 kN, y en ellas se puede observar la localización de más puntos de fisuración a medida que el nivel de carga aumenta.

Estos puntos de fisuración se localizan tanto en la sección D como en la C, ambas horizontales, y su localización corresponde con la de los puntos D1, D2 y D3 en la sección D, y C1, C2 y C3 en la sección C. La aparición de estos puntos de fisuración se presentó para un nivel de carga de 95 kN.

Posteriormente para el nivel de carga de 100 kN, el cual se muestra en la Fig. 6.64, se localiza un primer punto de fisuración en la sección horizontal del SFOD1, correspondiente a la localización del punto B1.

En las figuras correspondientes a la distribución de las deformaciones en las secciones verticales del SFOD1, se observa que en ninguna de estas secciones se presentan deformaciones mayores a la deformación máxima por tracción de $152\ \mu\epsilon$.

Por lo anterior, hasta los 100 kN de carga, no existe fisuración en alguna de las secciones verticales, aunque en la Fig. 6.64 se distinguen secciones como la 2, 4, 8 y 9, en las que se presentan deformaciones por tracción con valores cercanos a las $100\ \mu\epsilon$, que pueden indicar la posibilidad de que en esas secciones aparezcan puntos de fisuración a niveles de carga un poco superiores.

Respecto a los valores pico de la deformación asociada a los puntos de fisuración detectados en las secciones horizontales B, C y D, se observa que algunos de estos puntos adquieren valores con un nivel de deformación considerable. En la Fig. 6.63 se distinguen los puntos D1 y C1, con valores de deformación superiores a las $8000\ \mu\epsilon$ en ambos casos.

La Fig. 6.63 también muestra que a un nivel de carga de 100 kN, la fisuración todavía no alcanza la parte superior del alma de la viga I-2. Al observar la distribución de las deformaciones en la sección A, se aprecia que toda la sección se encuentra en compresión con un nivel de deformación prácticamente uniforme y cercano a las $-100\ \mu\epsilon$.

Viga I-2 (76 kN)

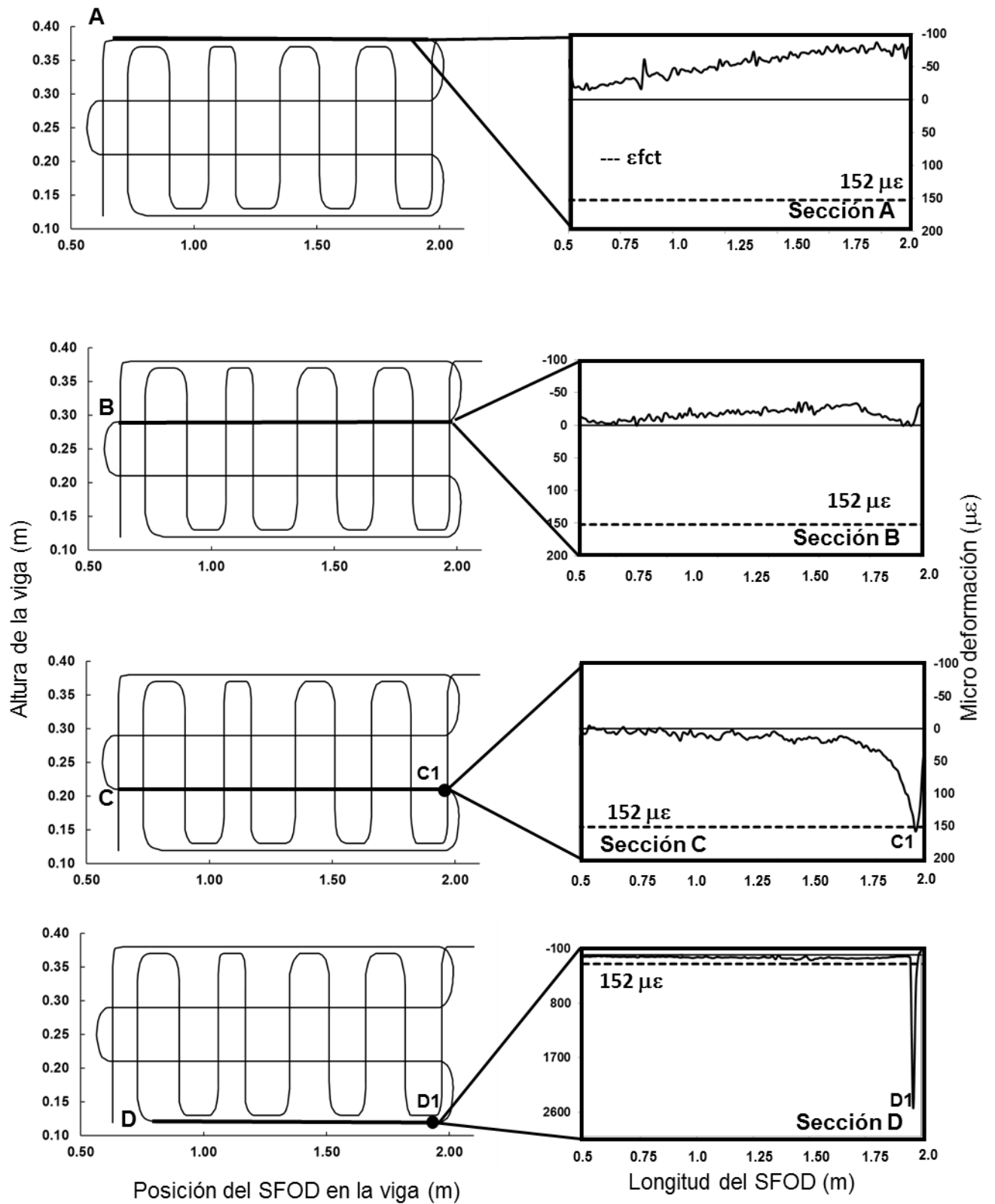


Fig. 6.57 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-2(76 kN).

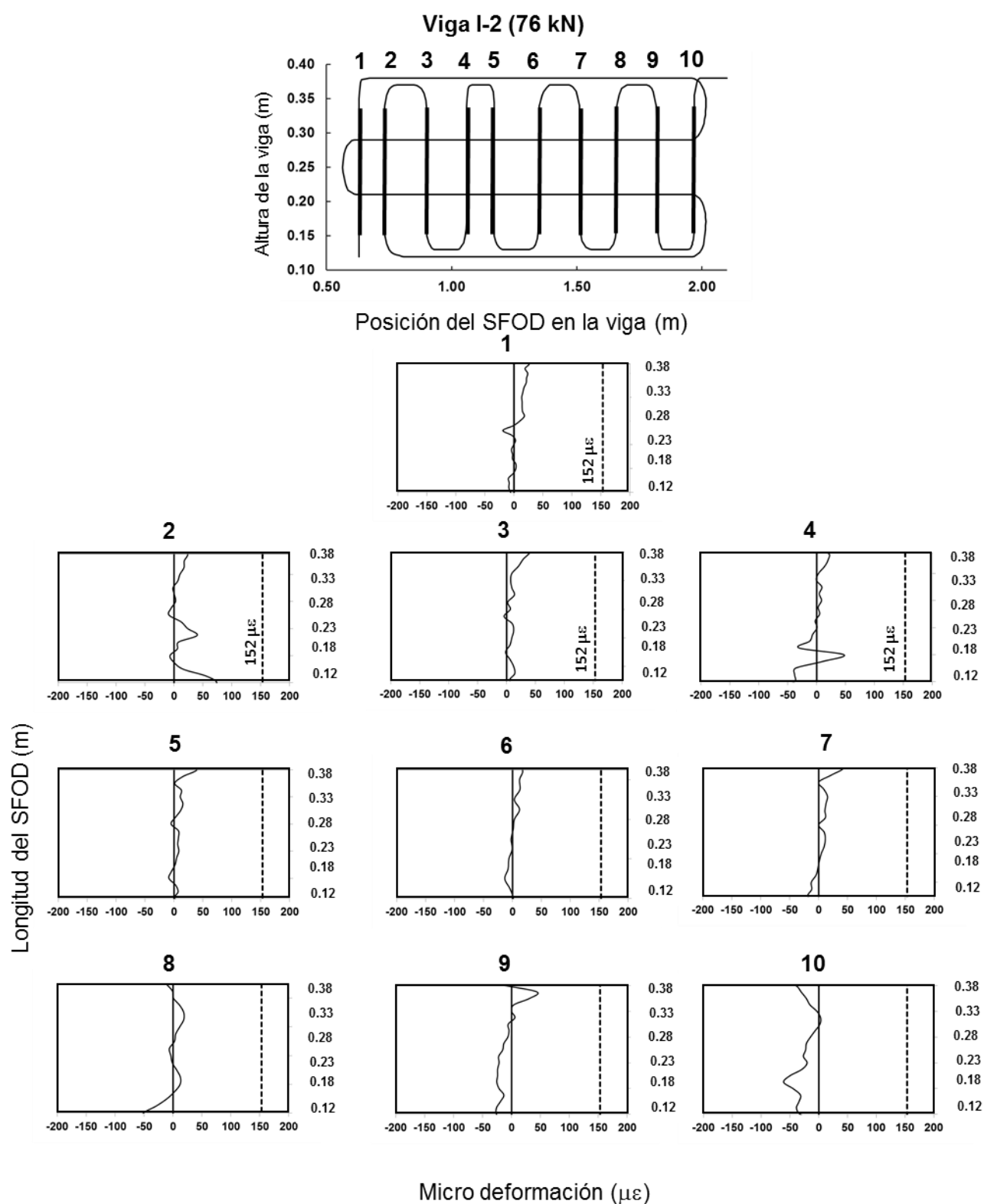


Fig. 6.58 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-2(76 kN).

Viga I-2 (88 kN)

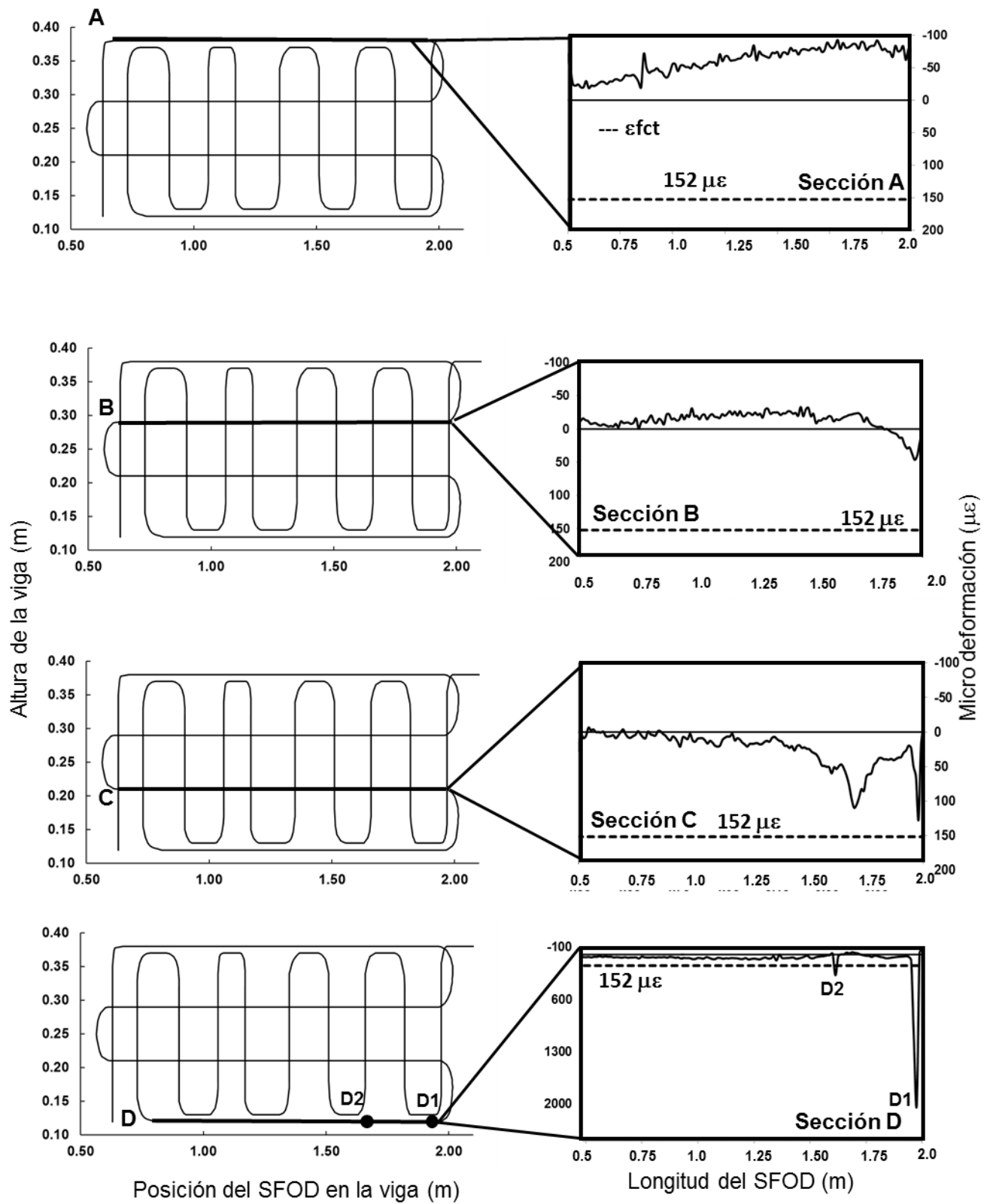


Fig. 6.59 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-2(88 kN).

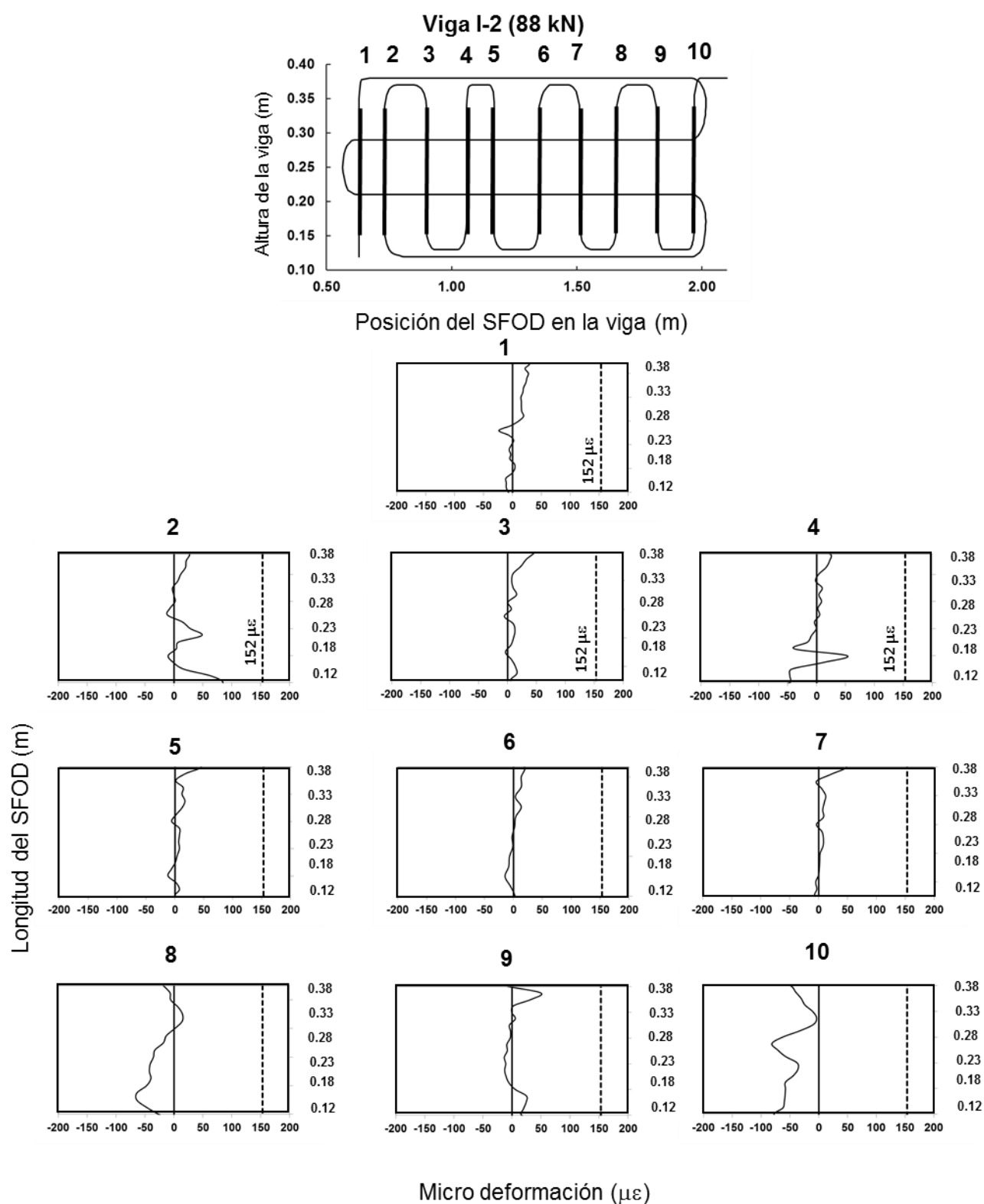


Fig. 6.60 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-2(88 kN).

Viga I-2 (95 kN)

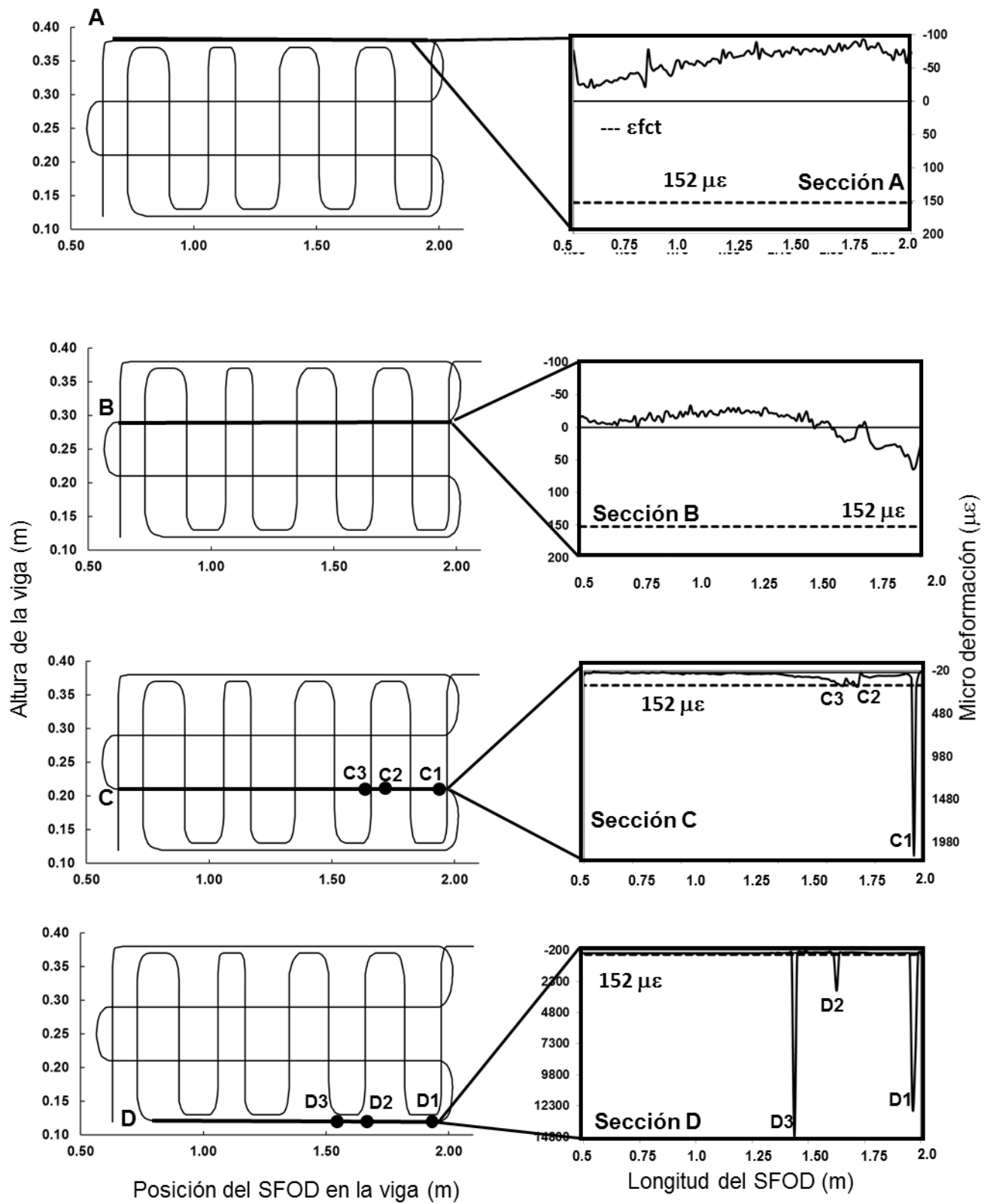


Fig. 6.61. Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-2(95 kN).

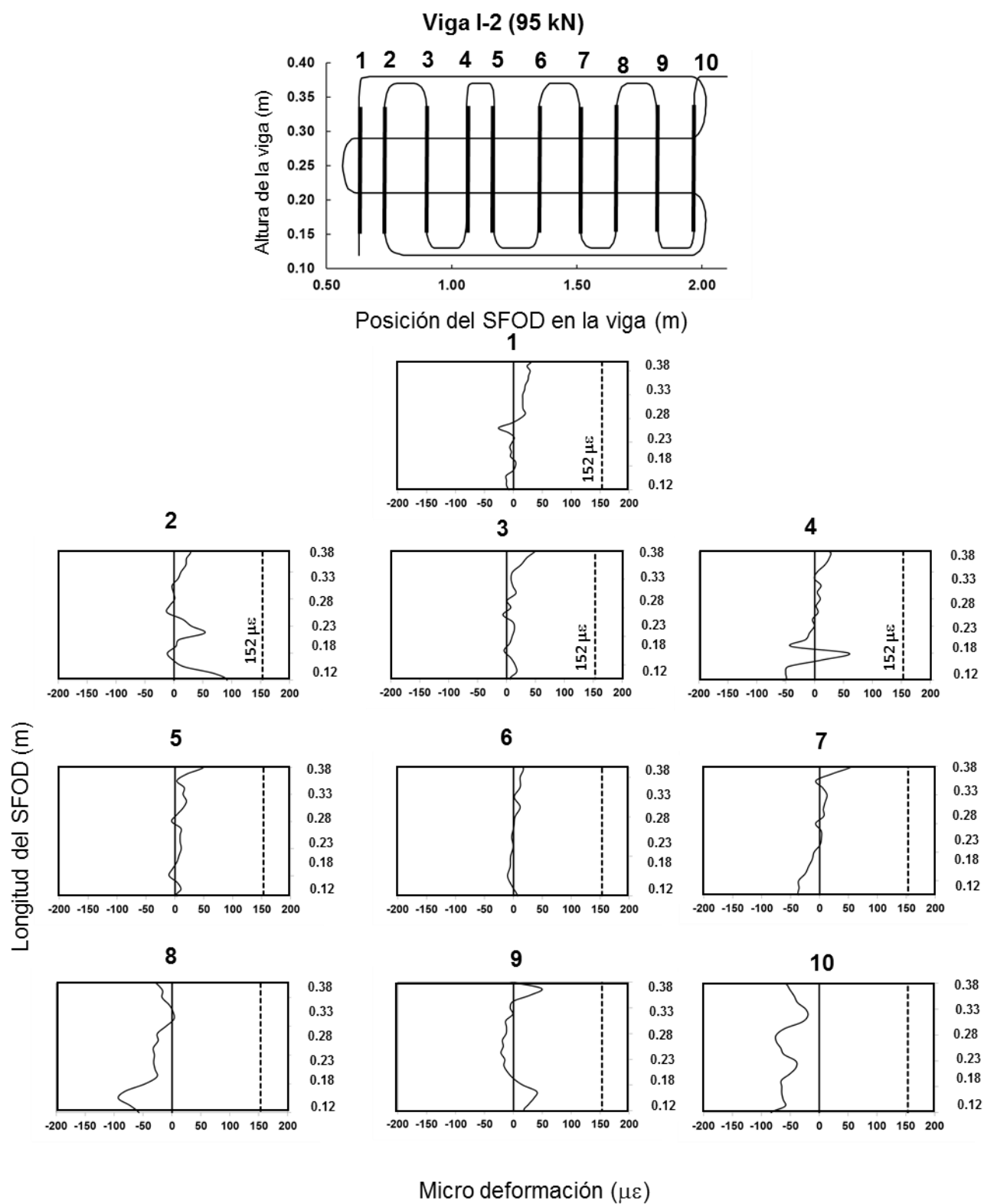


Fig. 6.62 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-2(95 kN).

Viga I-2 (100 kN)

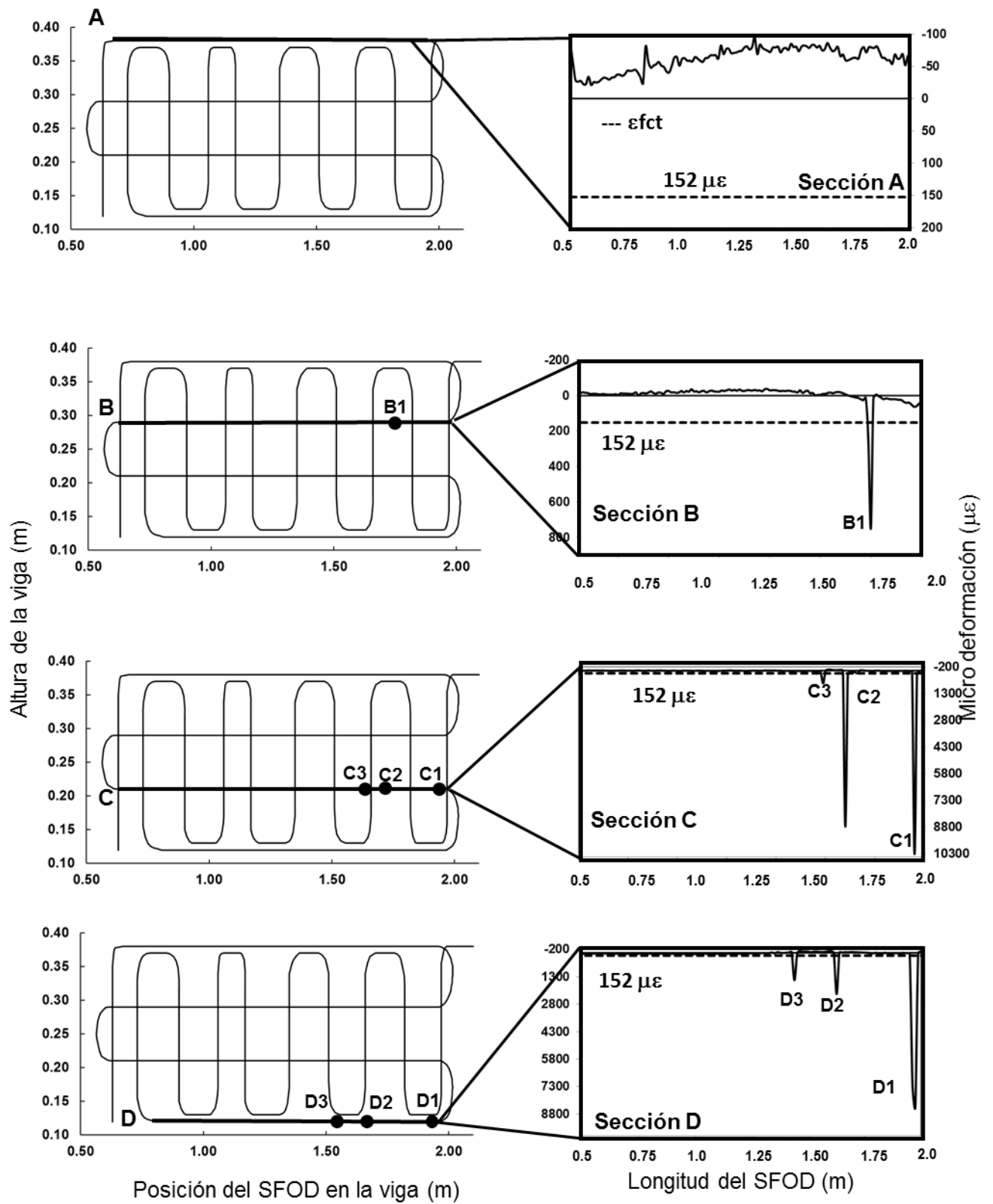


Fig. 6.63 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-2(100 kN).

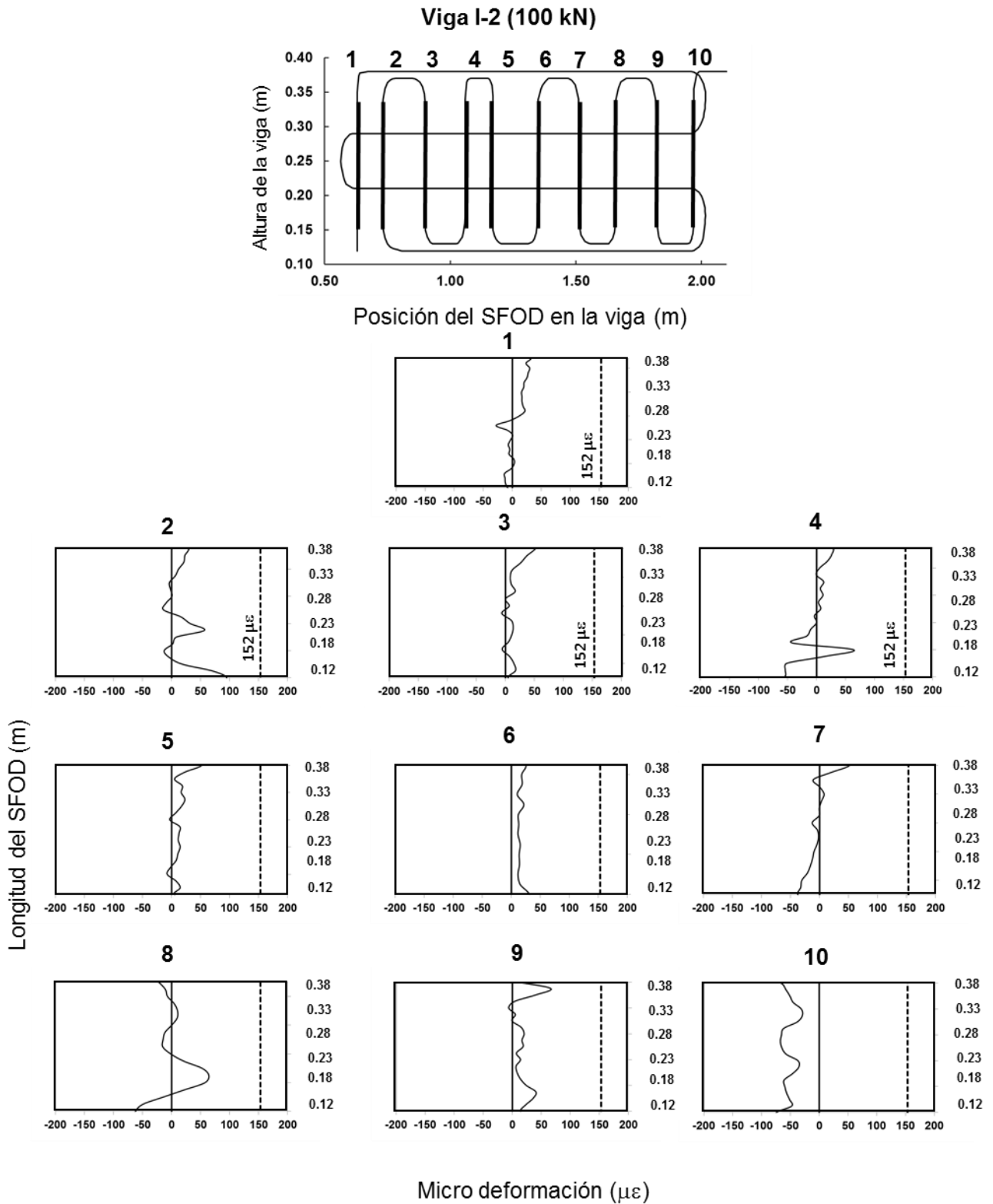


Fig. 6.64 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-2(100 kN).

De la Fig. 6.65 a la Fig. 6.70 se muestra la distribución de las deformaciones en las diferentes secciones del SFOD1 en la viga I-2, para niveles de carga entre 115 y 142 kN.

En la Fig. 6.65 se observa que para una carga de 115 kN en la sección D, se han localizado los puntos de fisuración D4 y D5 junto con los puntos D1, D2 y D3. Si bien la localización de los puntos D1, D2 y D3 corresponde al orden en el que han aparecido respecto a la aplicación de la carga durante el ensayo (Fig. 6.63), el punto D4 aunque aparece primero, se encuentra más alejado del punto de aplicación de la carga que el punto D5, que se localiza entre los puntos D1 y D2. Esto resulta importante en términos de monitorización, ya que el poder distinguir el orden en el cual aparecen las fisuras, puede ser un factor a considerar en un proceso de prevención o rehabilitación estructural.

En la Fig. 6.66 se aprecia que en la sección vertical 9, se localiza el primer punto de fisuración en esta dirección para un valor de la carga aplicada de 115 kN. A este punto se le asignó el número 9 por encontrarse en esa sección y el número 1 por ser el primer punto de fisuración localizado.

Posteriormente en las Figs 6.67 a 6.70 se muestra la distribución de las deformaciones para los niveles de carga de 123 a 142 kN. En estos niveles tanto en dirección horizontal como en vertical, aparecen más puntos de fisuración, incluso en la sección horizontal A, aparece un primer punto de fisuración a 123 kN de carga. Todos estos puntos de fisuración son identificados en forma progresiva, y sus coordenadas respecto al marco de referencia establecido se encuentran en las Tablas A.3 y A.4 del anexo A.

En las figuras anteriores, los niveles de deformación que se presentan en los puntos de fisuración identificados, resultan ya con valores considerables. Si se observa su variación en cada incremento de carga, se distingue en cada punto que el nivel de deformación puede variar al aumentar y disminuir en forma aleatoria. Estas variaciones se pueden asociar al nivel de fisuración que presenta la viga a estos niveles de carga. Las fisuras pueden abrir en primera instancia, posteriormente abrir más, o bien cerrar parcialmente dependiendo de la aparición de otros puntos de fisuración en otras secciones del alma de la viga.

El fenómeno anterior también está asociado a la composición no homogénea del hormigón y a la no linealidad del fenómeno de cortante, lo que produce que la aparición de fisuras y su localización no puedan ser predichas *a priori*.

Viga I-2 (115 kN)

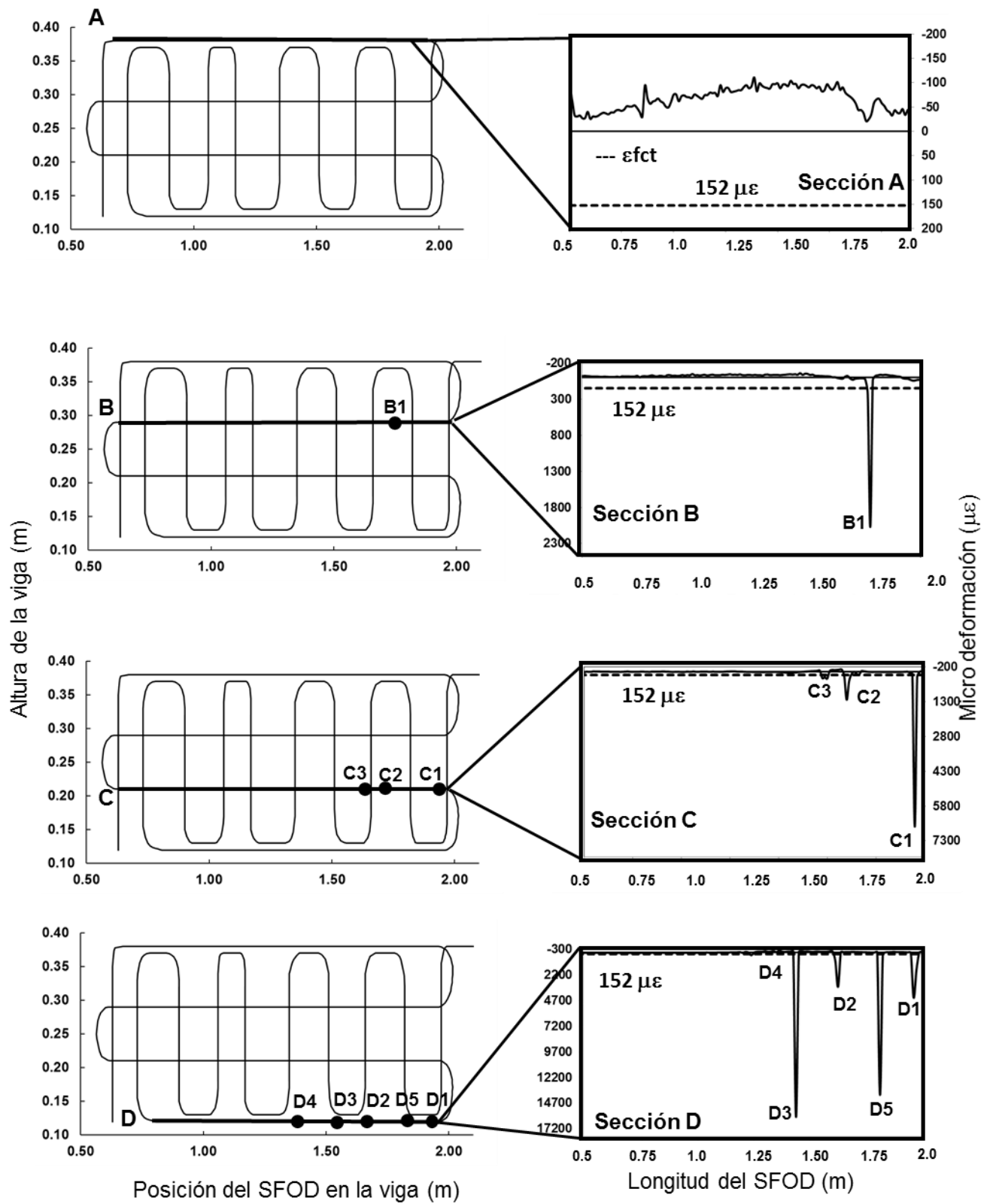


Fig. 6.65 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-2(115 kN).

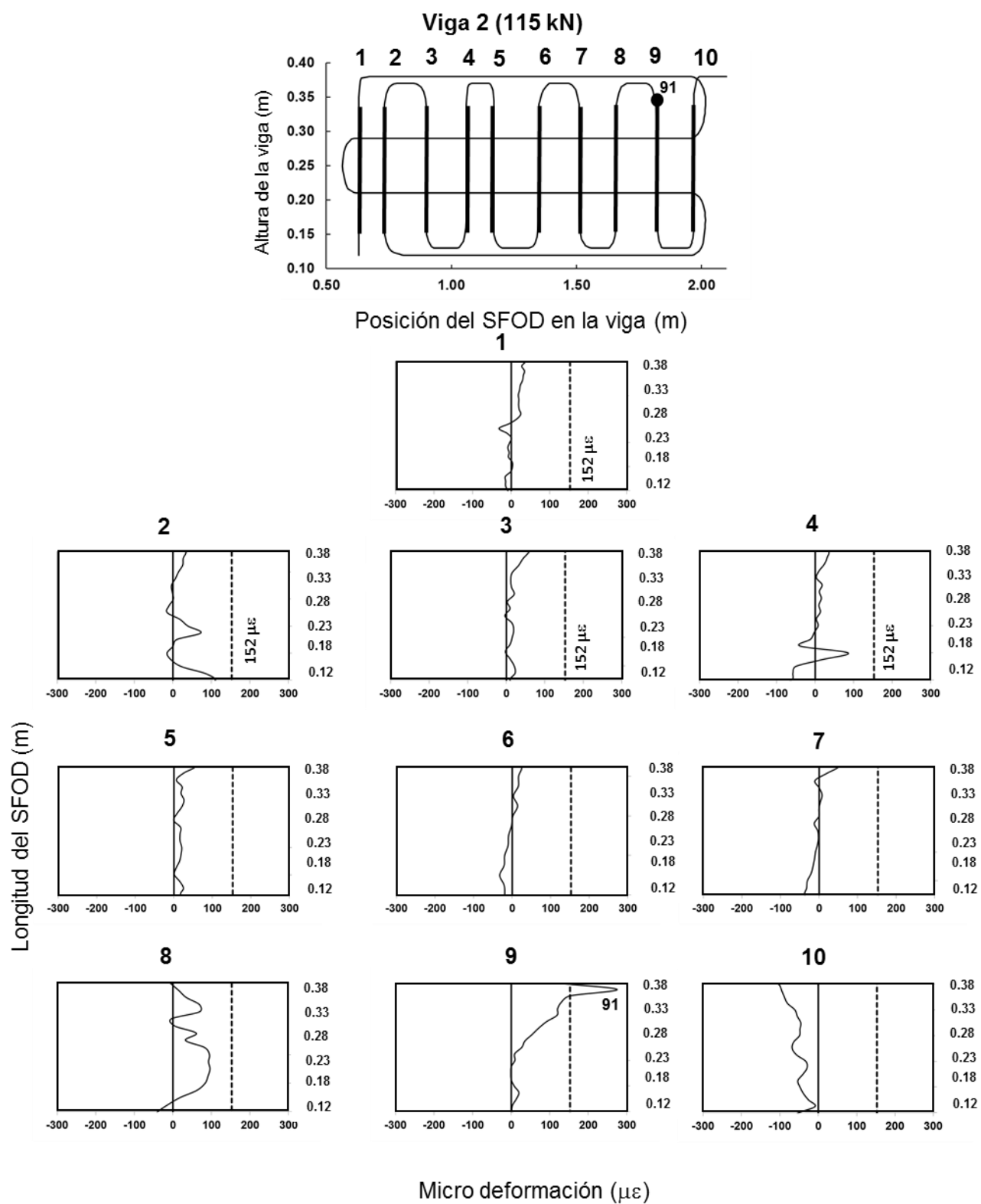


Fig. 6.66 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-2(115 kN).

Viga I-2 (123 kN)

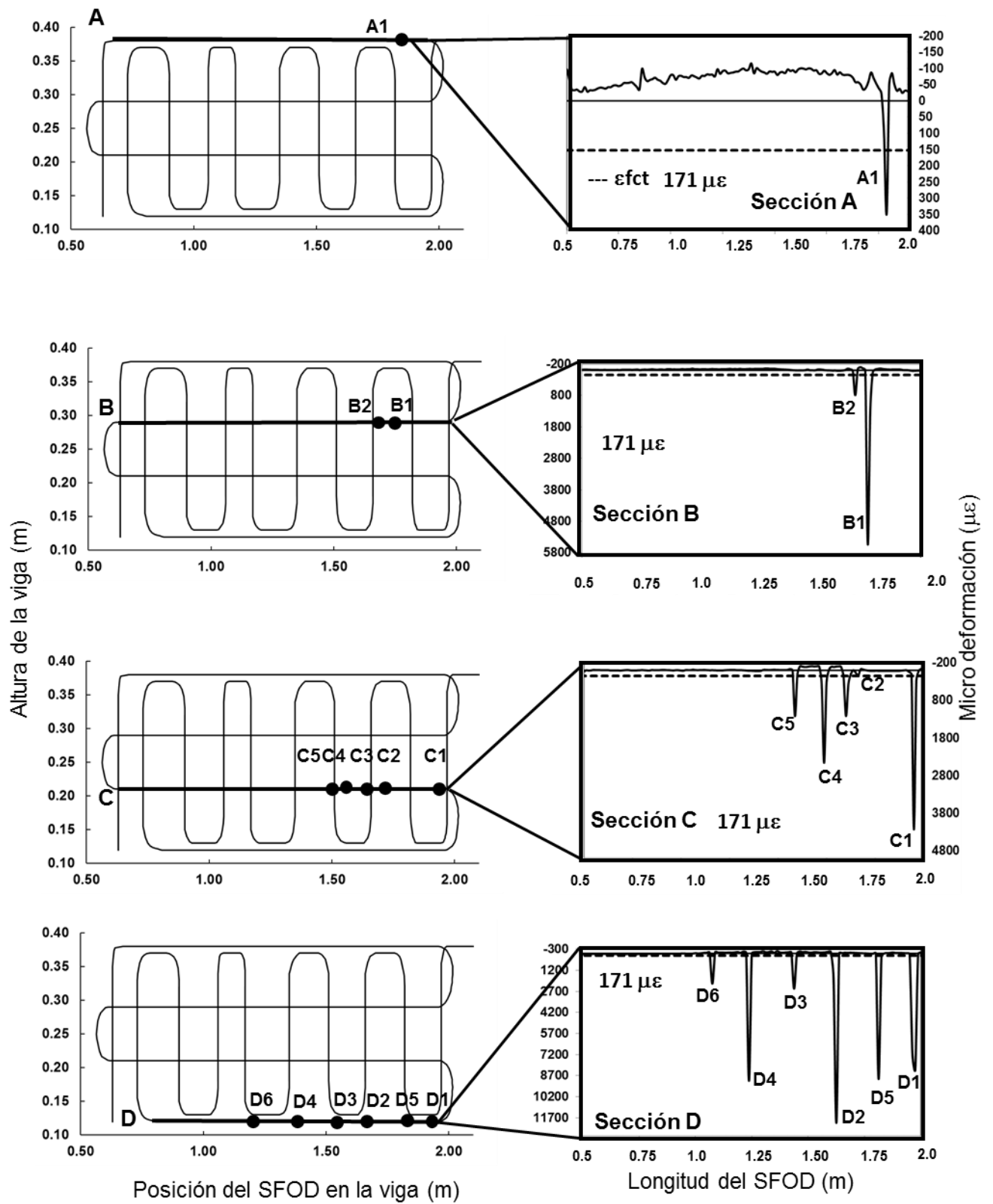


Fig. 6.67 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-2(123 kN).

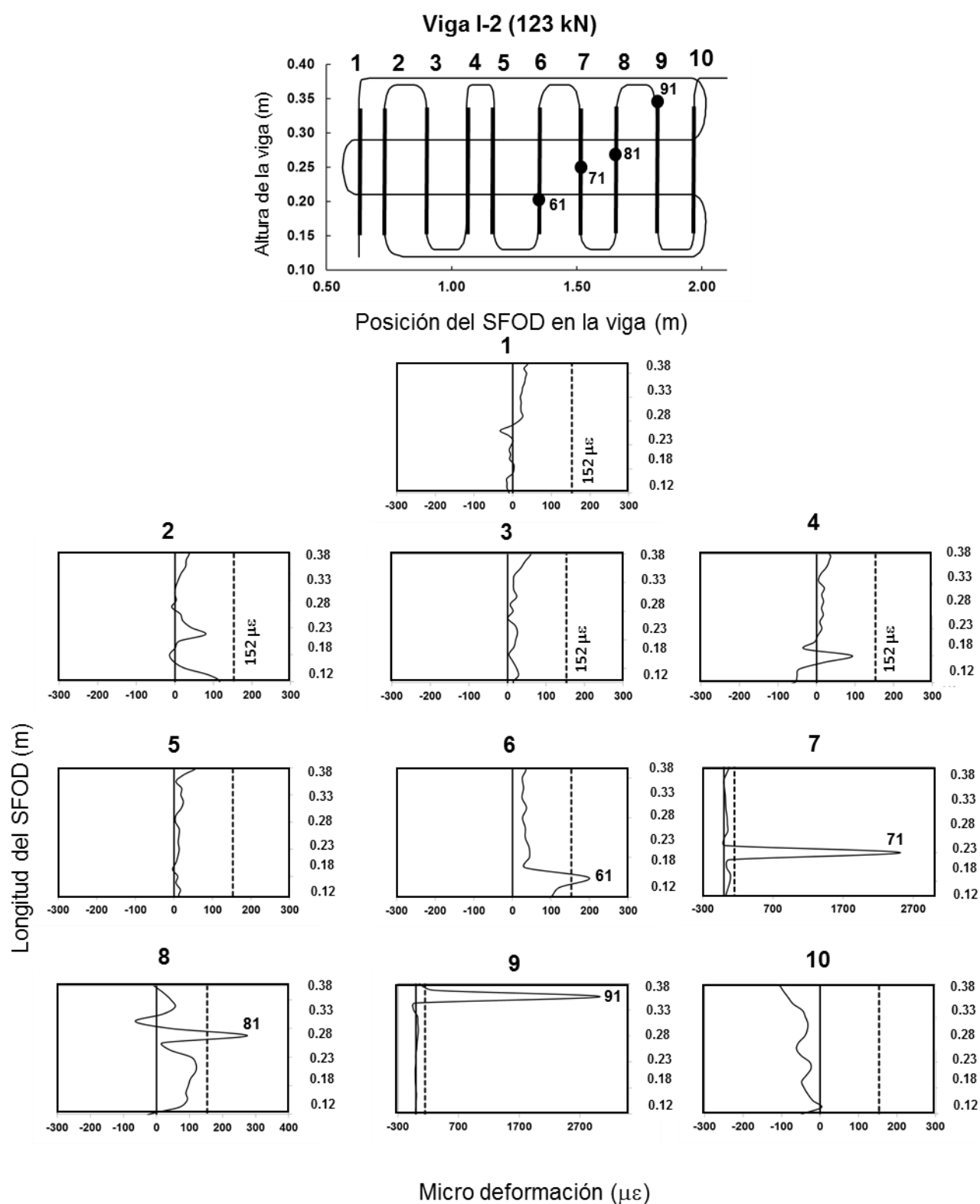


Fig. 6.68 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-2(123 kN).

Viga I-2 (142 kN)

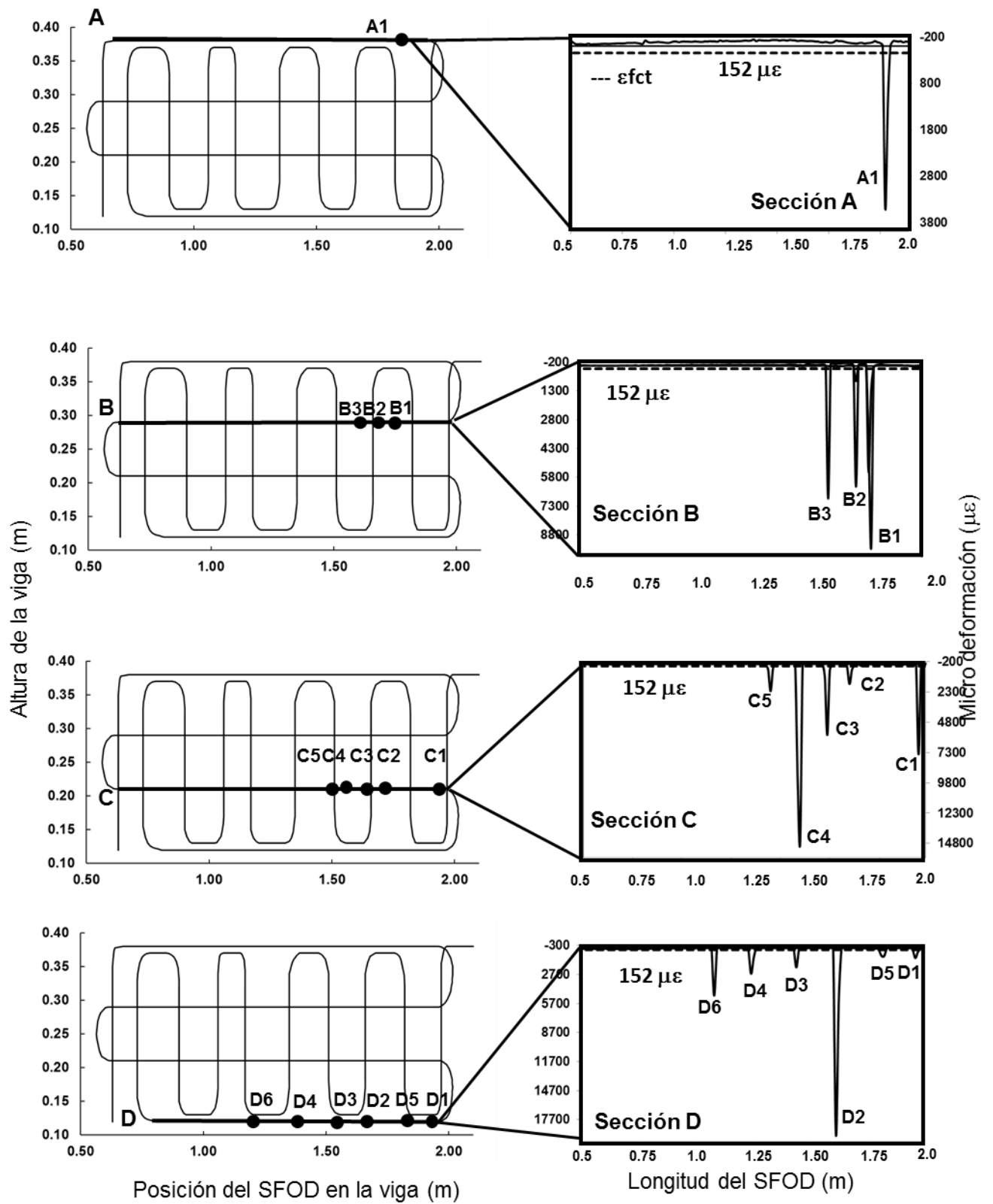


Fig. 6.69 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-2(142 kN).

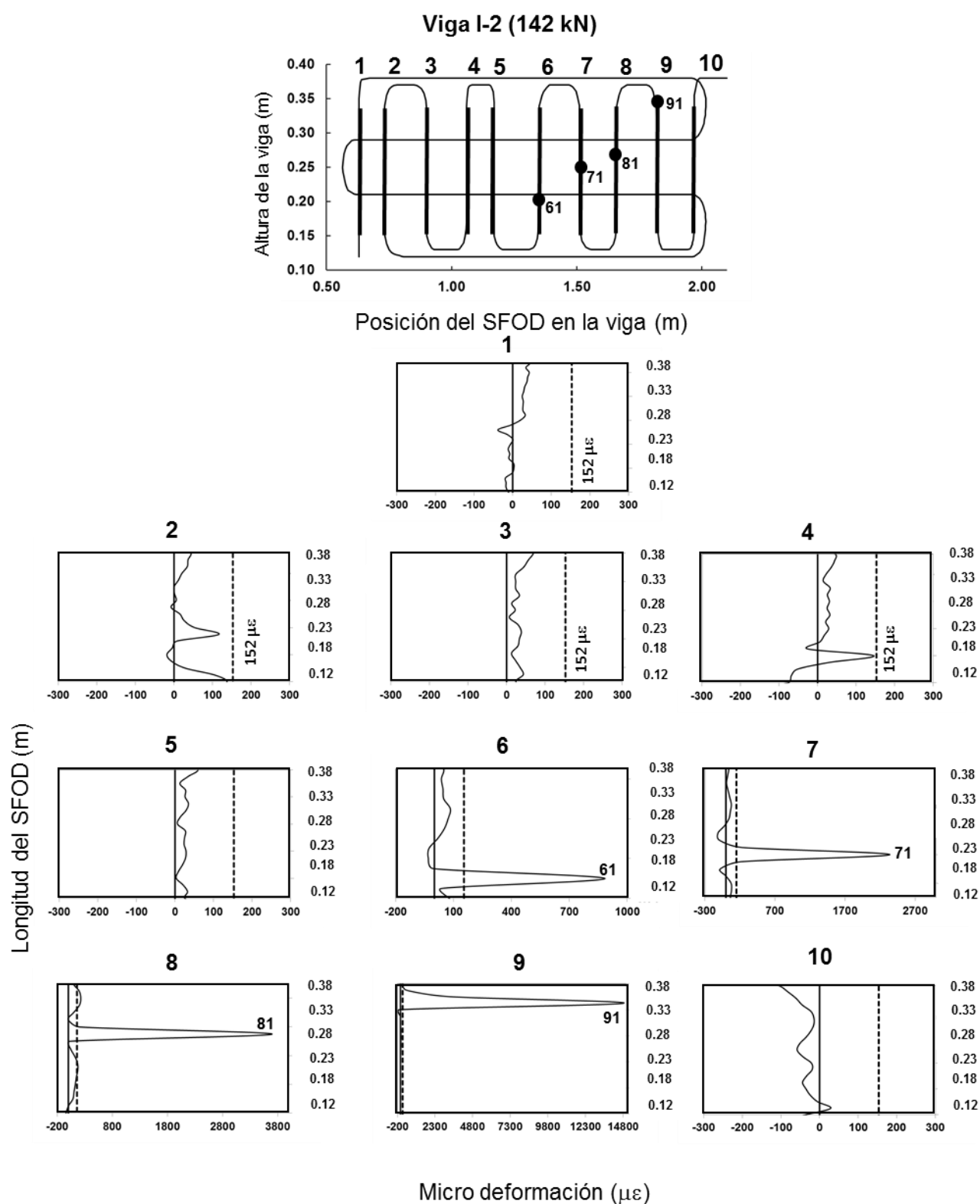


Fig. 6.70 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-2(142 kN).

Con relación a las deformaciones que se presentan en las secciones verticales, en la Fig. 6.70 se muestra la presencia de puntos de fisuración nuevamente en la sección 9, también en las secciones 6, 7, y en la sección 4 aparece un pico muy próximo a las 152 $\mu\epsilon$

A continuación en las Figs. 6.71 a 6.78 se muestra la variación de las deformaciones para niveles de carga entre los 203 y 260 kN. Las secciones horizontales presentan un buen número de puntos de fisuración con altos niveles de deformación.

En las Tablas A.10 y A.11 del anexo A se muestran para cada nivel de carga, las deformaciones máximas asociadas a cada uno de los puntos de fisuración en todas las secciones del SFOD. Se puede apreciar en estas tablas el nivel de carga en el que cada uno de los puntos de fisuración localizados ha sido detectado, junto con la variación de la deformación máxima asociada a cada uno de estos puntos.

Resulta claro por el número de puntos y su localización por sección, que la fisuración de la viga I-2 se conformó hasta los 115 kN, solamente por puntos en las secciones horizontales. A partir de este nivel de carga, los puntos de fisuración se presentaron en forma combinada, tanto en las secciones horizontales como en las verticales. De esta forma, las Figs. 6.71 y 6.72 muestran como a partir del nivel de carga de 203 kN, la viga I-2 presentaba un estado de fisuración con un número de fisuras considerable tanto en la dirección horizontal como en la vertical.

También se puede apreciar en las Figs. 6.71 a 6.78, como en la sección A del SFOD1 que se encuentra sujeta principalmente a compresión, se van localizando progresivamente puntos de fisuración, como por ejemplo los puntos A1, A2, A3 y A4.

Para el caso de carga de 260 kN en las algunas secciones tanto horizontales como verticales, algunos de los puntos de fisuración detectados presentan deformaciones máximas que se encuentran por encima del umbral de deformaciones que pueden ser capturadas por el sistema OBR. Este umbral de acuerdo a la Tabla 5.3 del capítulo 5 es de $\pm 15000 \mu\epsilon$. Todos los puntos que sobrepasan dicho umbral, se pueden encontrar en las Tablas 6.40 a 6.43. Como ejemplos de estos puntos se mencionan el B1 y 51 a un nivel de carga de 203 kN, que presentan deformaciones máximas de 15583 $\mu\epsilon$ y 16817 $\mu\epsilon$ respectivamente, y los puntos A2 y 61 a un nivel de carga de 260 kN, con deformaciones máximas de 18077 $\mu\epsilon$ y 17345 $\mu\epsilon$. En este sentido el sistema OBR es capaz de medir deformaciones que sobrepasan el umbral establecido en las especificaciones, debido a que generalmente en los sistemas de medición estos umbrales límite se establecen como indicativos de valores que de sobrepasarse podrían dañar al sensor, pero que en términos cuantitativos aún pueden considerarse válidos.

Viga I-2 (203 kN)

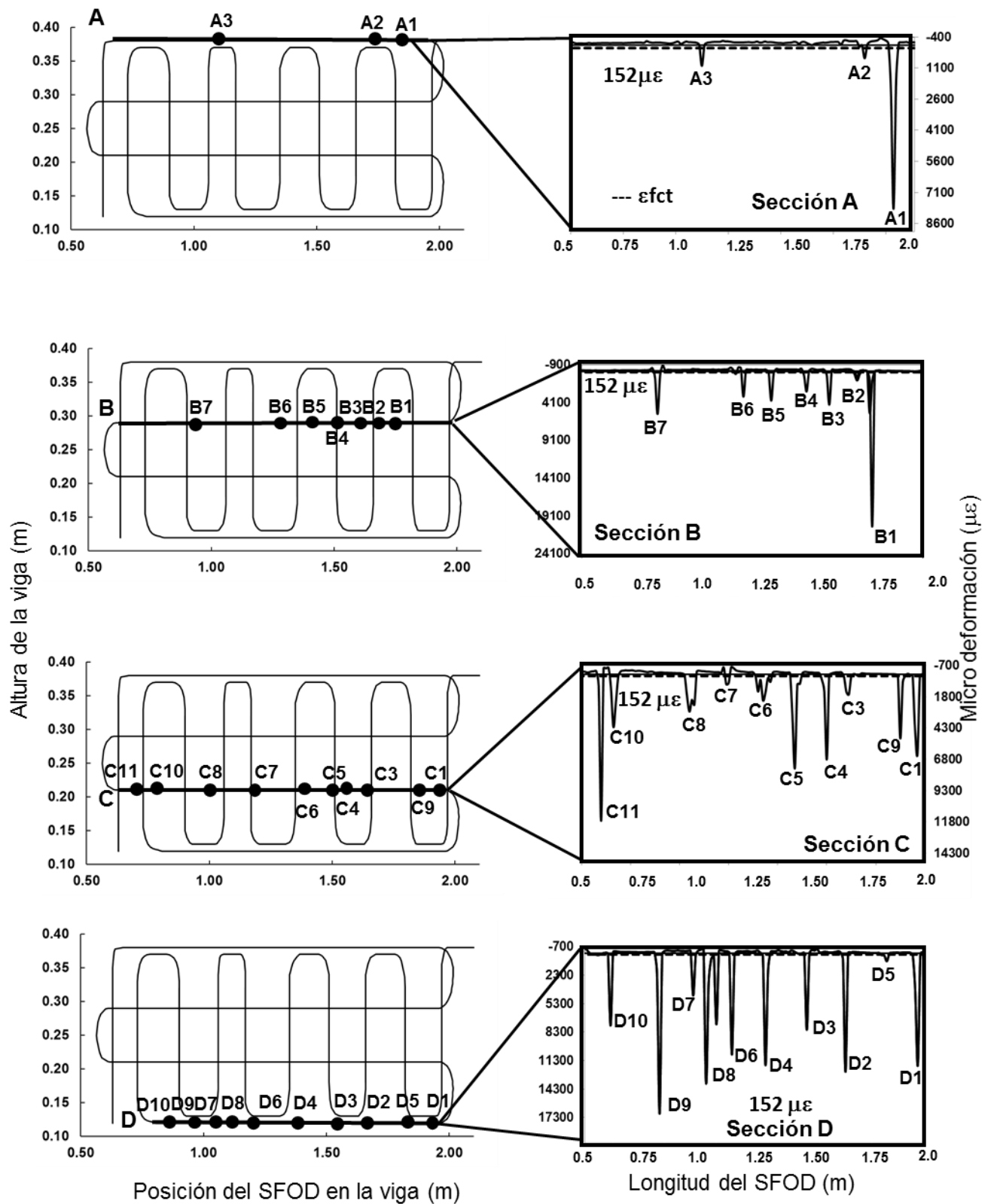


Fig. 6.71 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-2(203 kN).

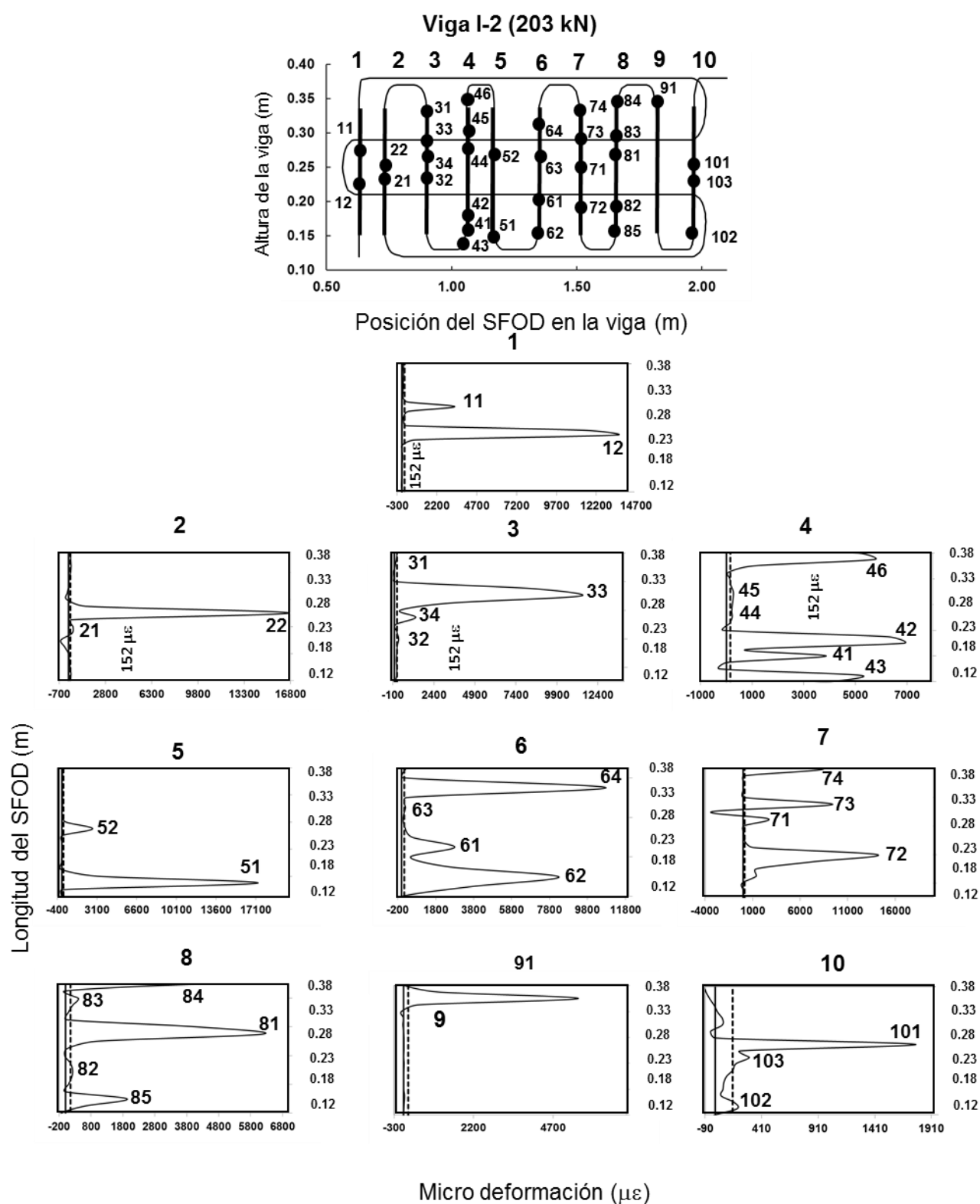


Fig. 6.72 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 9 del SFOD1 en la viga I-2(203 kN).

Viga I-2 (213 kN)

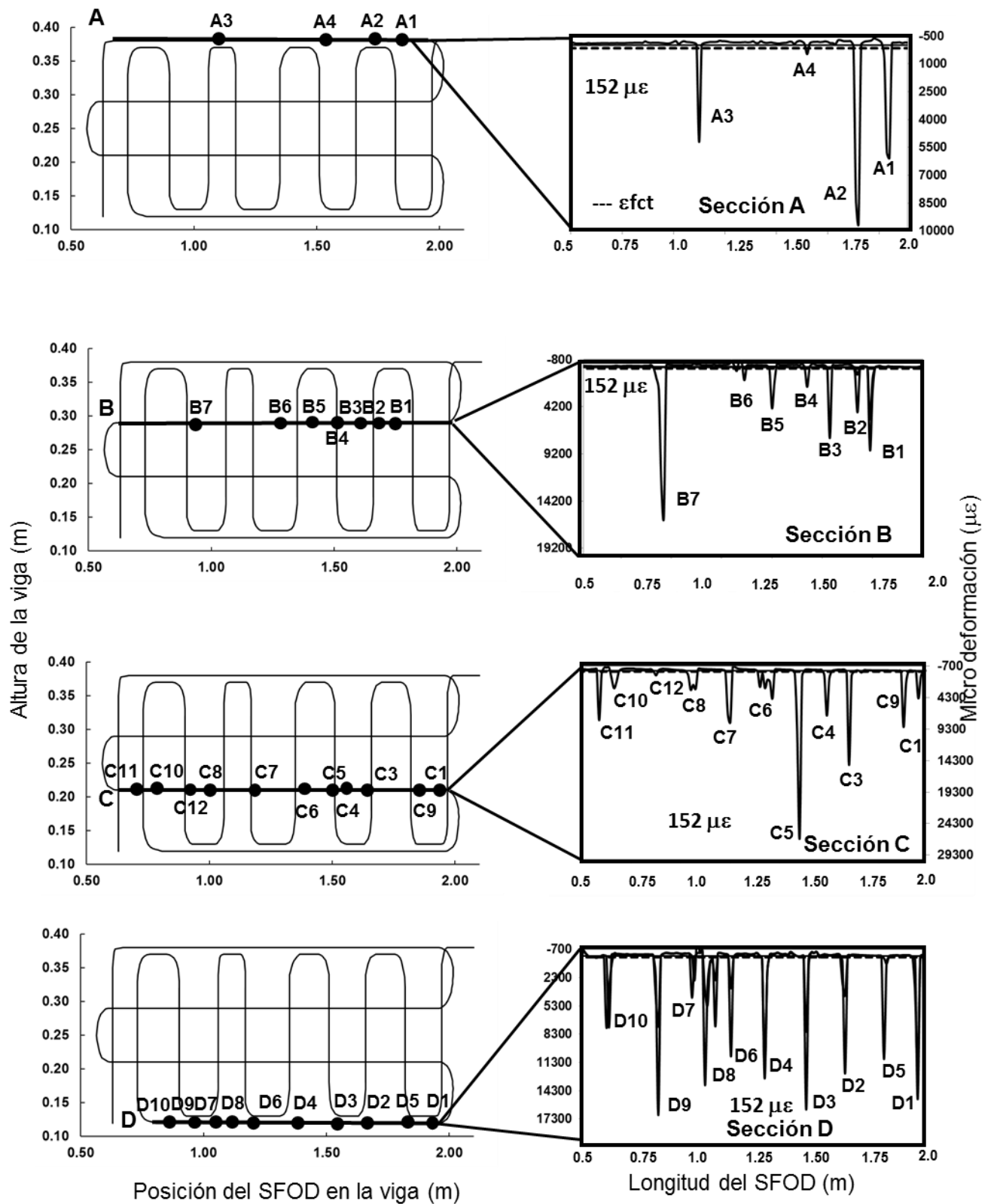


Fig. 6.73 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-2(213 kN).

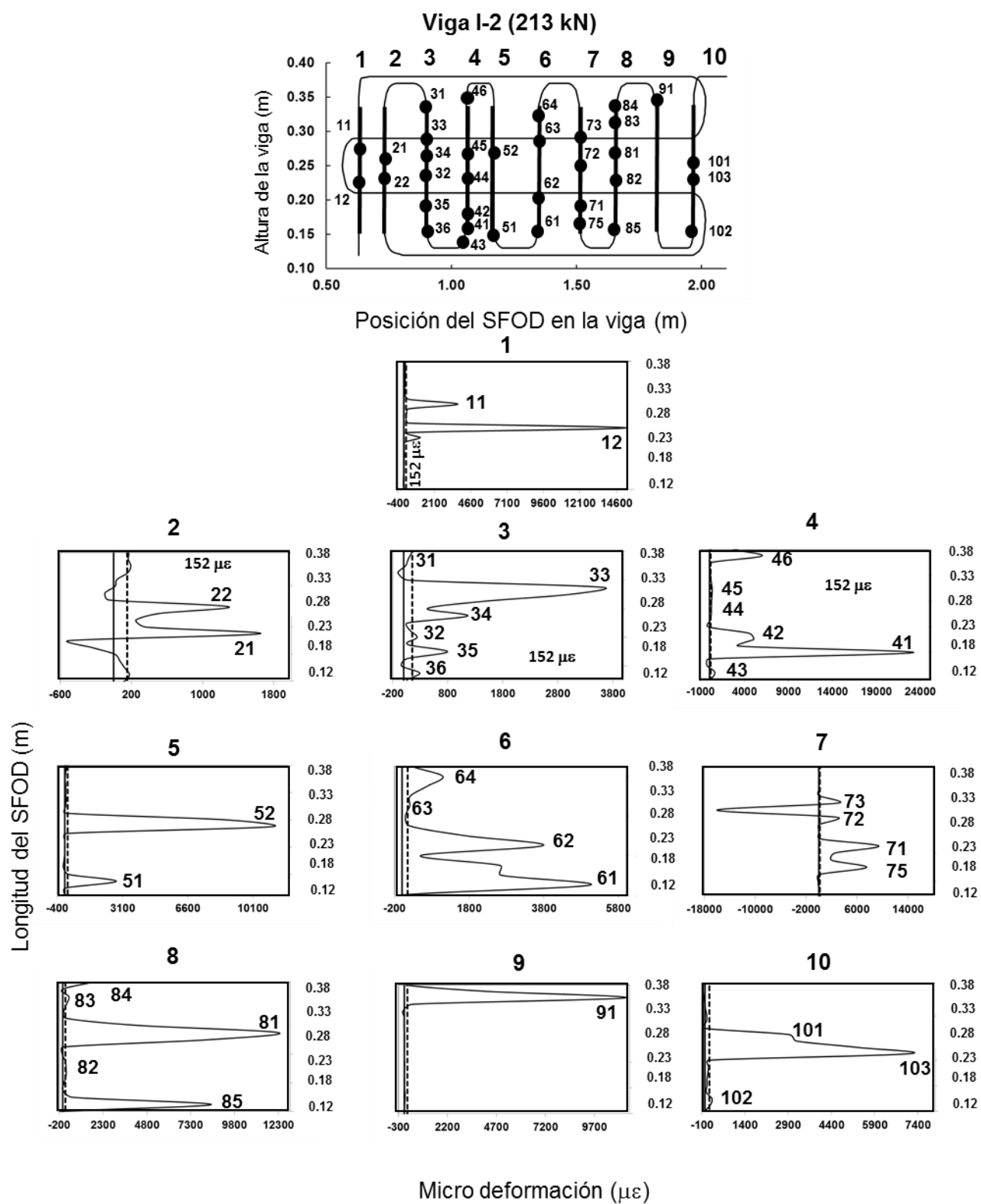


Fig 6.74 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 9 del SFOD1 en la viga I-2(213 kN).

Viga I-2 (224 kN)

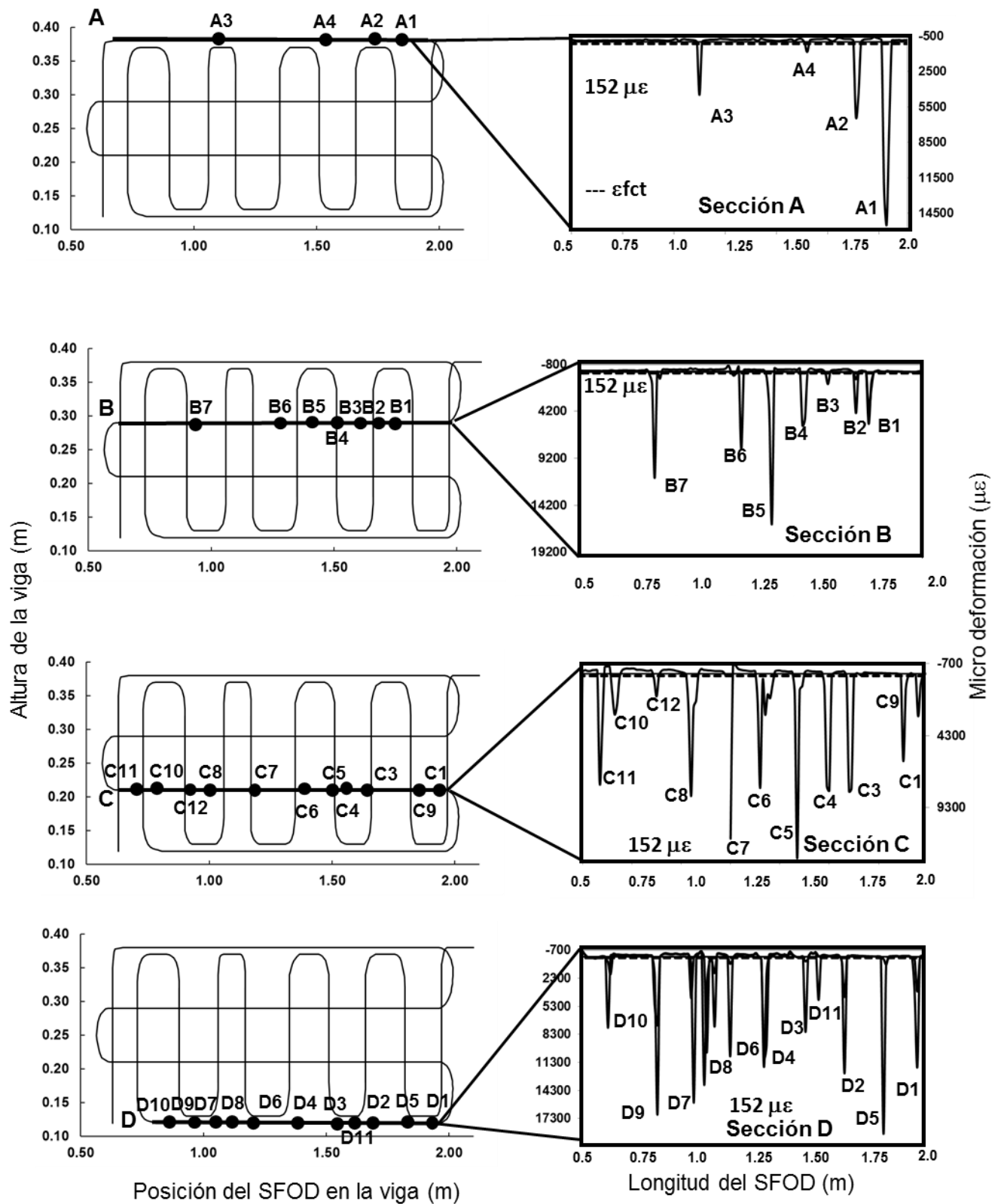


Fig. 6.75 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-2(224 kN).

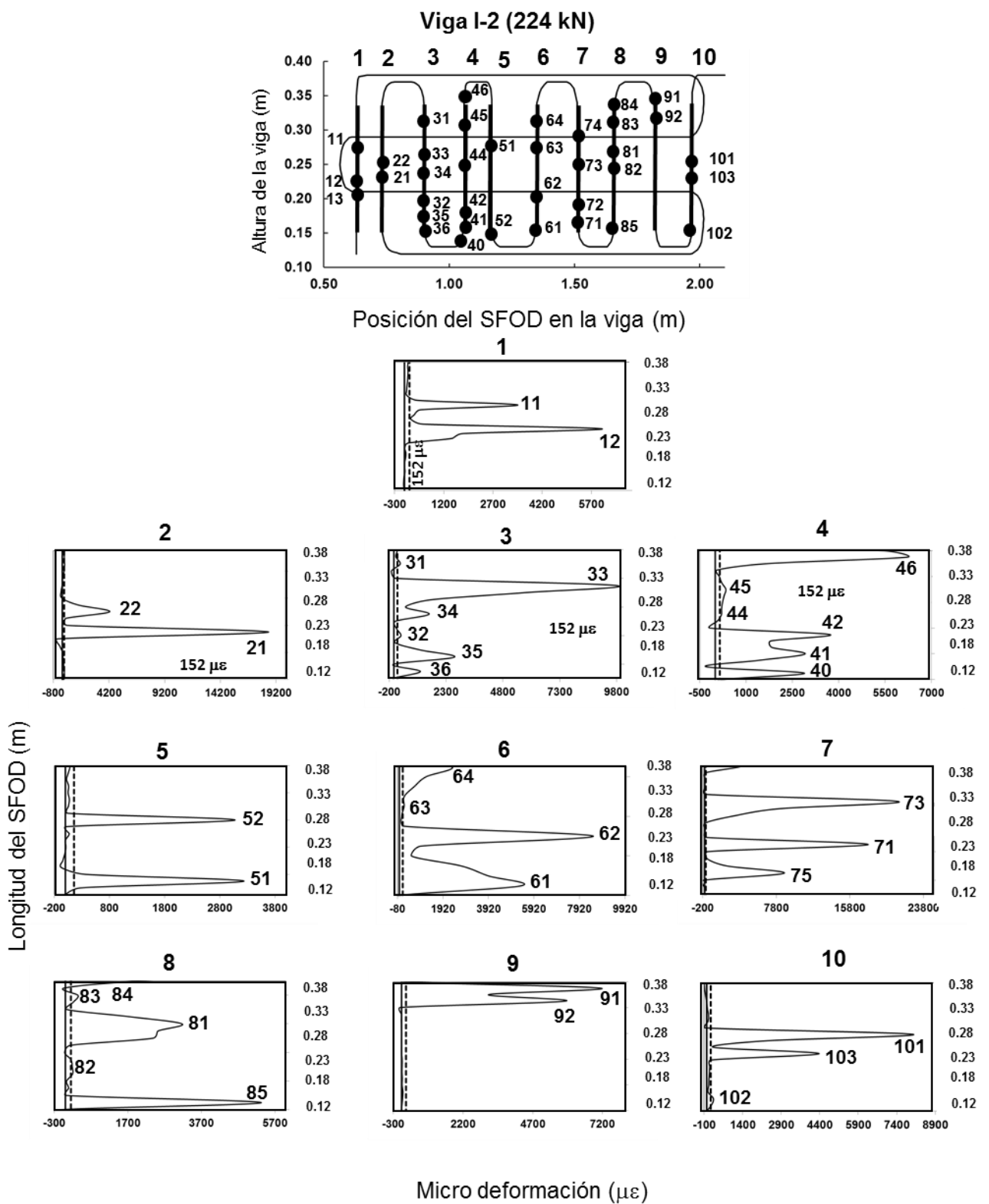


Fig. 6.76 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 9 del SFOD1 en la viga I-2(224 kN).

Viga I-2 (260 kN)

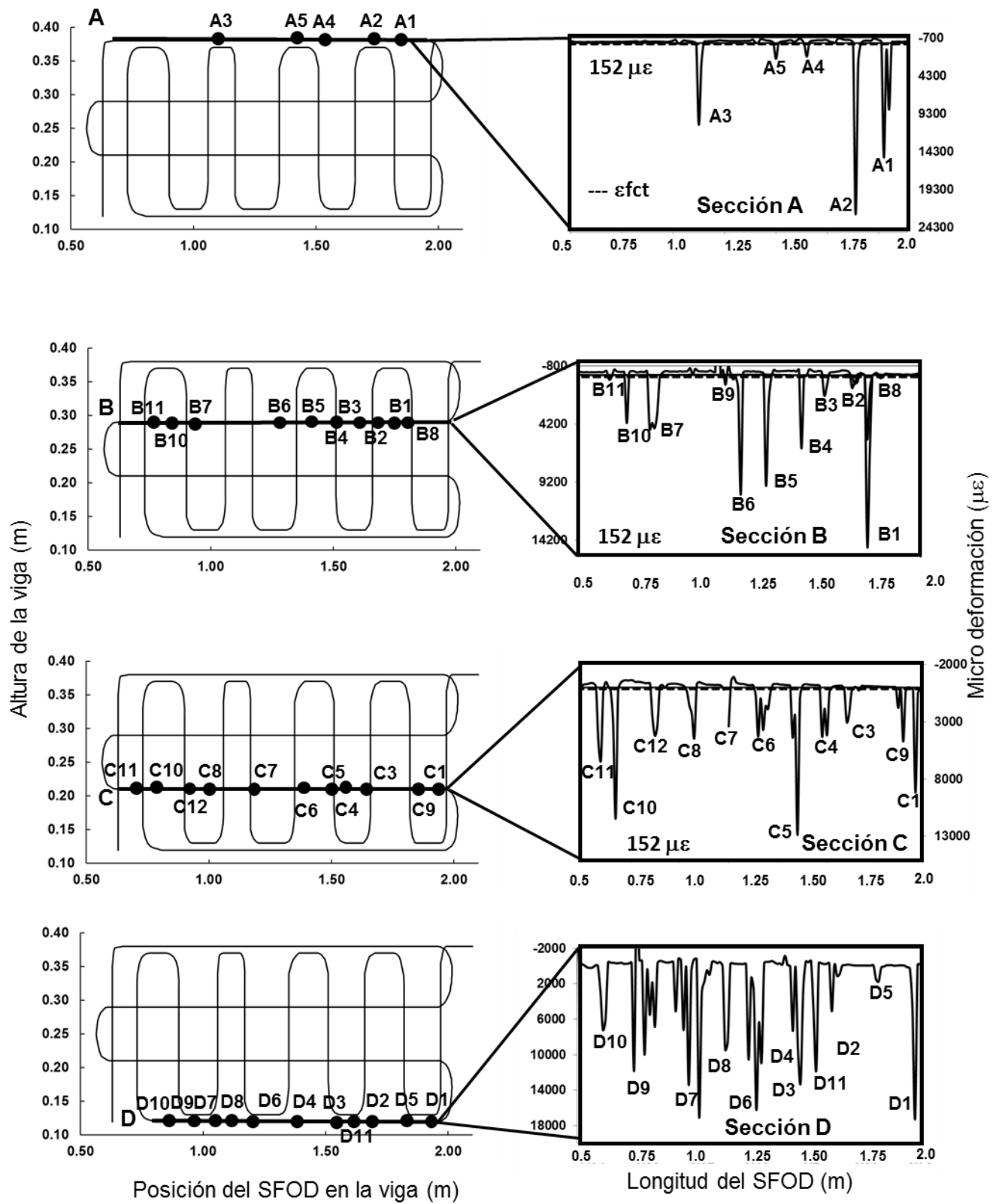


Fig. 6.77 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-2(260 kN).

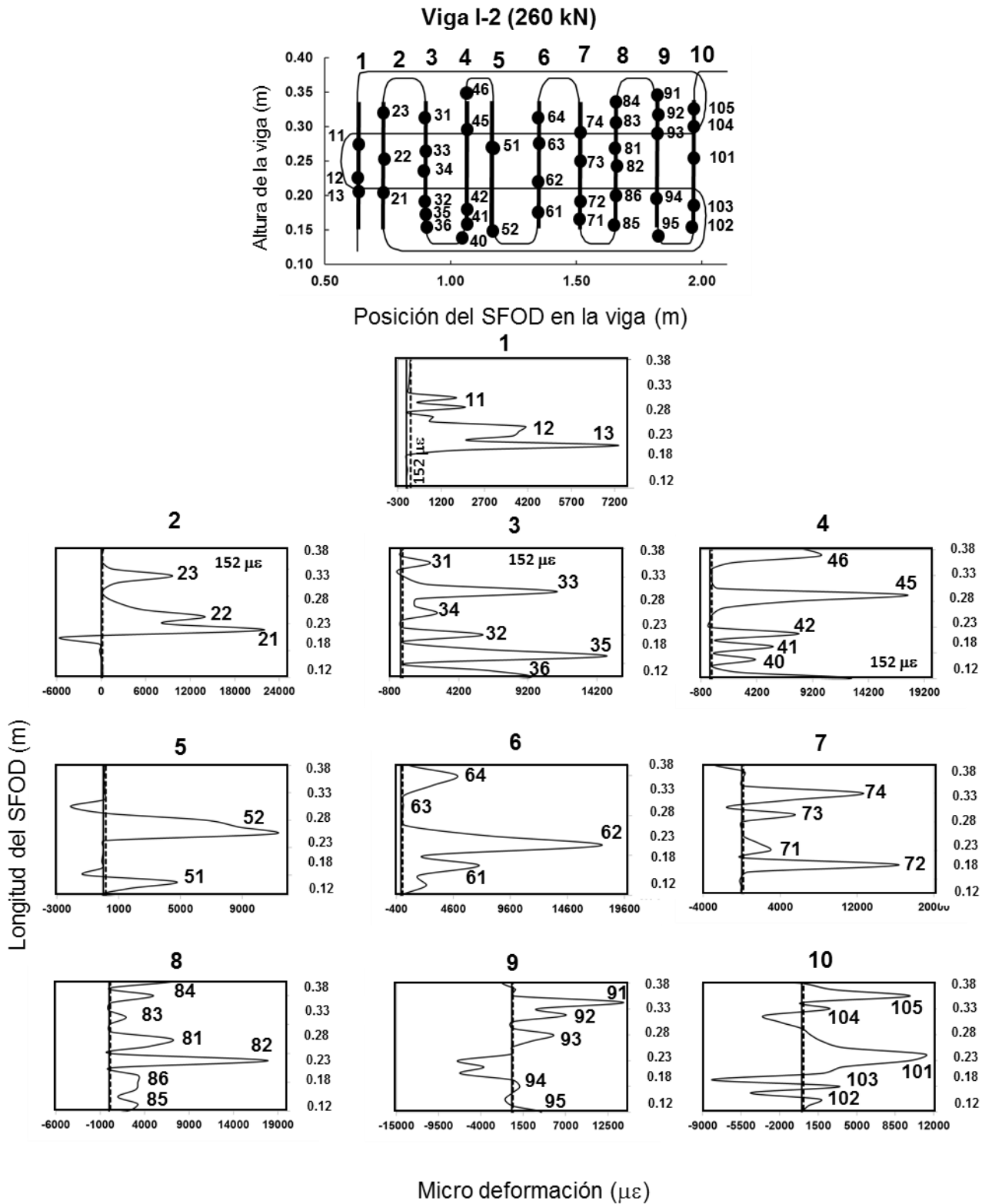


Fig.6.78 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 9 del SFOD1 en la viga I-2(260 kN).

6.2.4.3 Viga I-3

En las Figs. 6.79 y 6.80 se muestra la distribución de las deformaciones en la viga I-3, en el momento en que se da inicio a la conformación de un posible fisura, a partir del punto D2 y a un nivel de carga de 158 kN.

En forma similar a los dos ensayos anteriores, en la Fig. 6.79 se aprecia que la sección A del SFOD1 adherido al alma de la viga, muestran valores de deformación en compresión, mientras que en la sección B se aprecian valores prácticamente nulos en toda su longitud. Lo anterior indica una gran proximidad de esta sección del SFOD1 con el eje neutro de la viga I-3.

También en la Fig. 6.79 se observa que en las secciones C y D, las deformaciones muestran valores de tracción con una tendencia a incrementarse con relación al punto de aplicación de carga durante el ensayo. En la sección D aparece el punto de fisuración D2 el cual superó el umbral de deformación de la viga I-3, que conforme a la Tabla 5.2 del capítulo cinco, es de $171 \mu\epsilon$.

En la Fig. 6.80 se muestran los niveles de deformación en las 10 secciones verticales del SFOD1 y a un nivel de carga de 158 kN. En estas secciones, bajo una carga de 158 kN, no se aprecian todavía valores de fisuración superiores al umbral de $171 \mu\epsilon$.

A partir de la Fig. 6.81 a la 6.86, se muestra la localización de puntos de fisura tanto en las secciones verticales como horizontales, para niveles de carga comprendidos entre los 163 kN y los 171 kN. Se observa que en la dirección horizontal, los puntos de fisuración que se han localizado, se presentan únicamente en las secciones C y D. Si se compara con el comportamiento de las vigas I-1 e I-2 incluso a niveles de carga menores, se aprecia que éstas vigas presentaban puntos de fisuración hasta las secciones B (Fig. 6.39) e incluso en la sección A para el caso de la viga I-2 (Fig. 6.69). Lo anterior implica un nivel de fisuración mayor a menores niveles de carga en las vigas de los dos primeros ensayos que en la I-3.

También se pudo observar que en las secciones verticales, aparecen puntos de fisuración, los cuales se presentan entre las secciones 6 a 10, lo que es lógico debido a la cercanía de estas secciones respecto al punto de aplicación de la carga durante el ensayo.

Viga I-3 (158 kN)

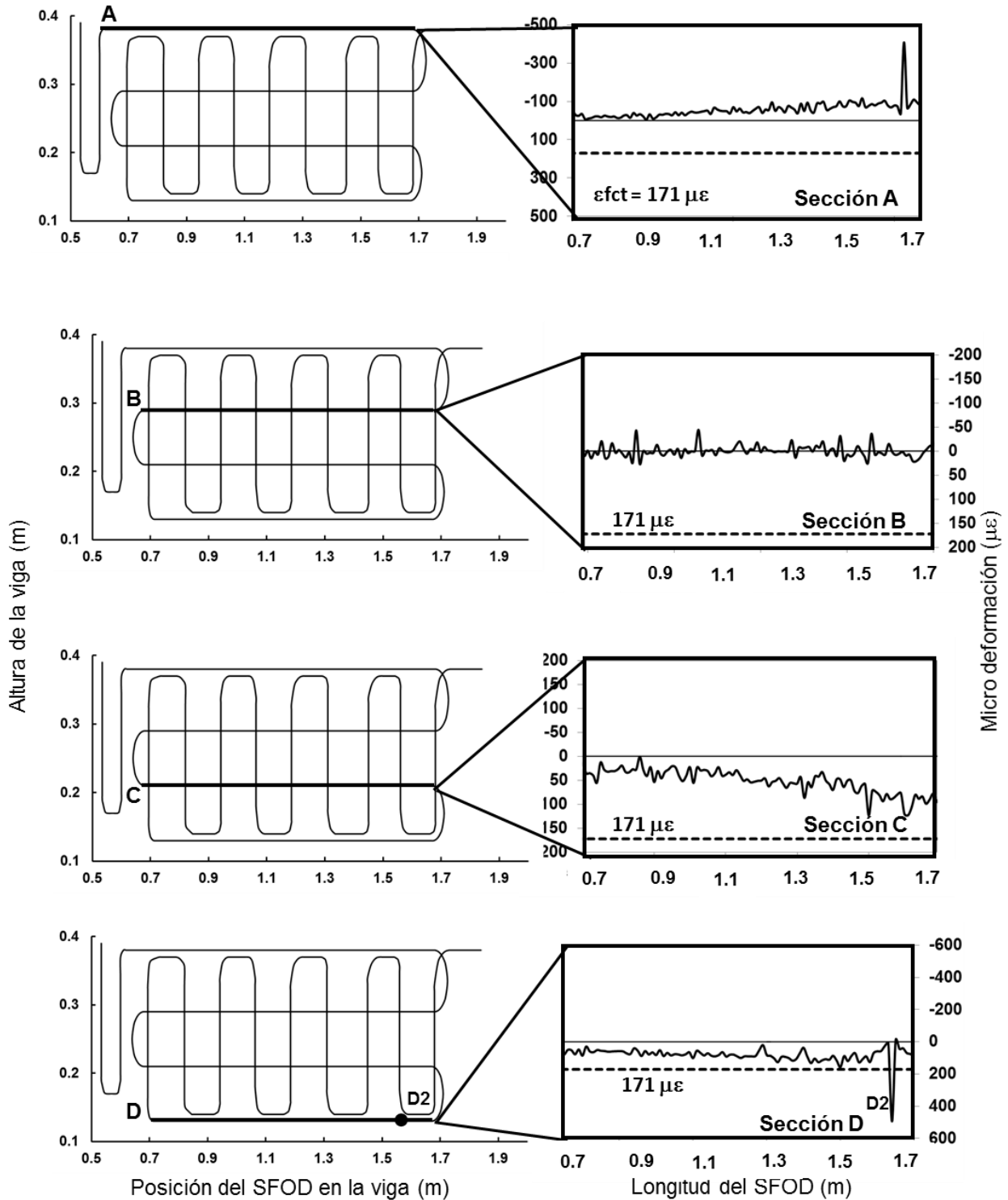


Fig.6.79 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-3(158 kN).

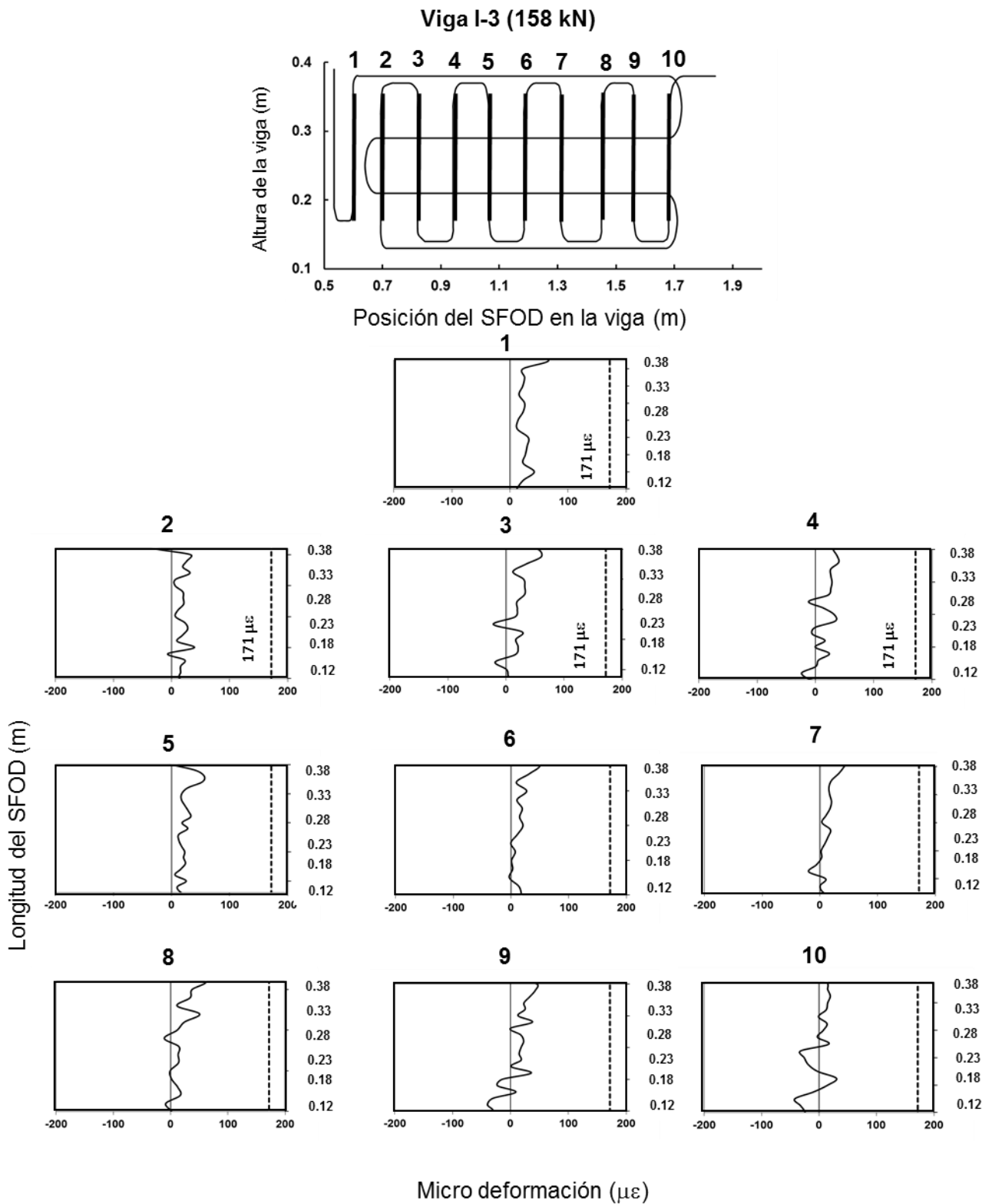


Fig. 6.80 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-3(158 kN).

Viga I-3 (163 kN)

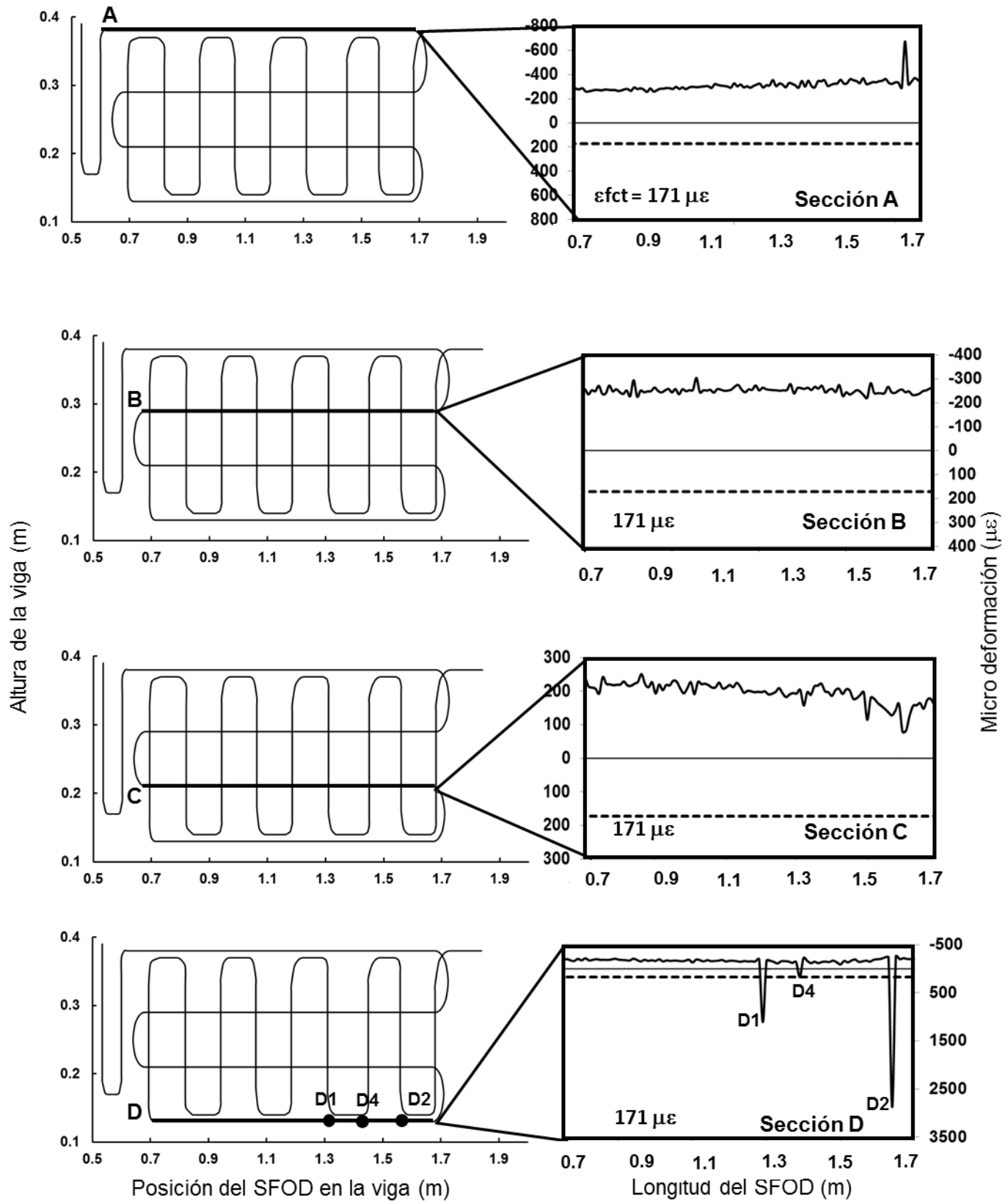


Fig. 6.81 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-3(163 kN).

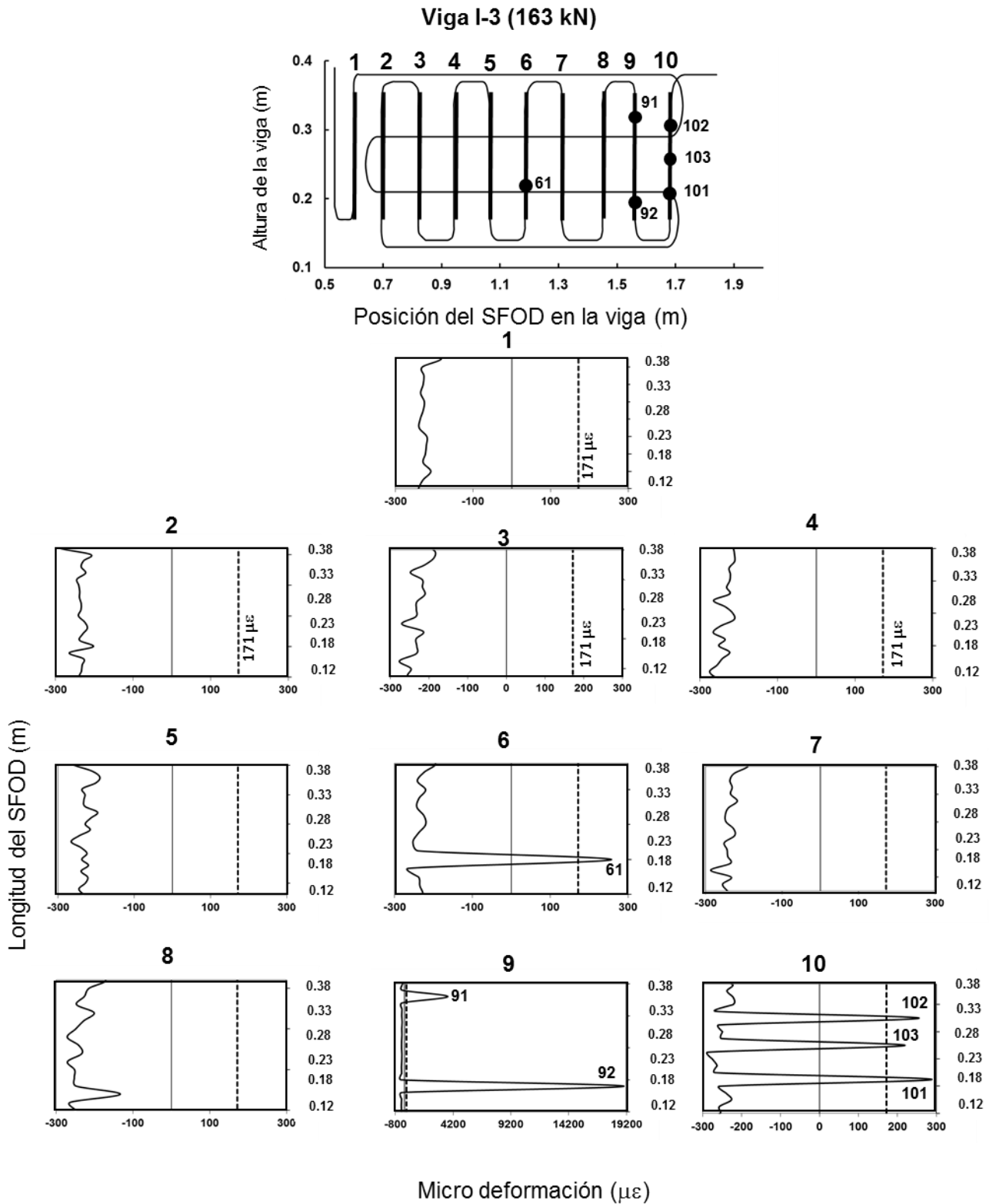


Fig. 6.82 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-3(163 kN).

Viga I-3 (169 kN)

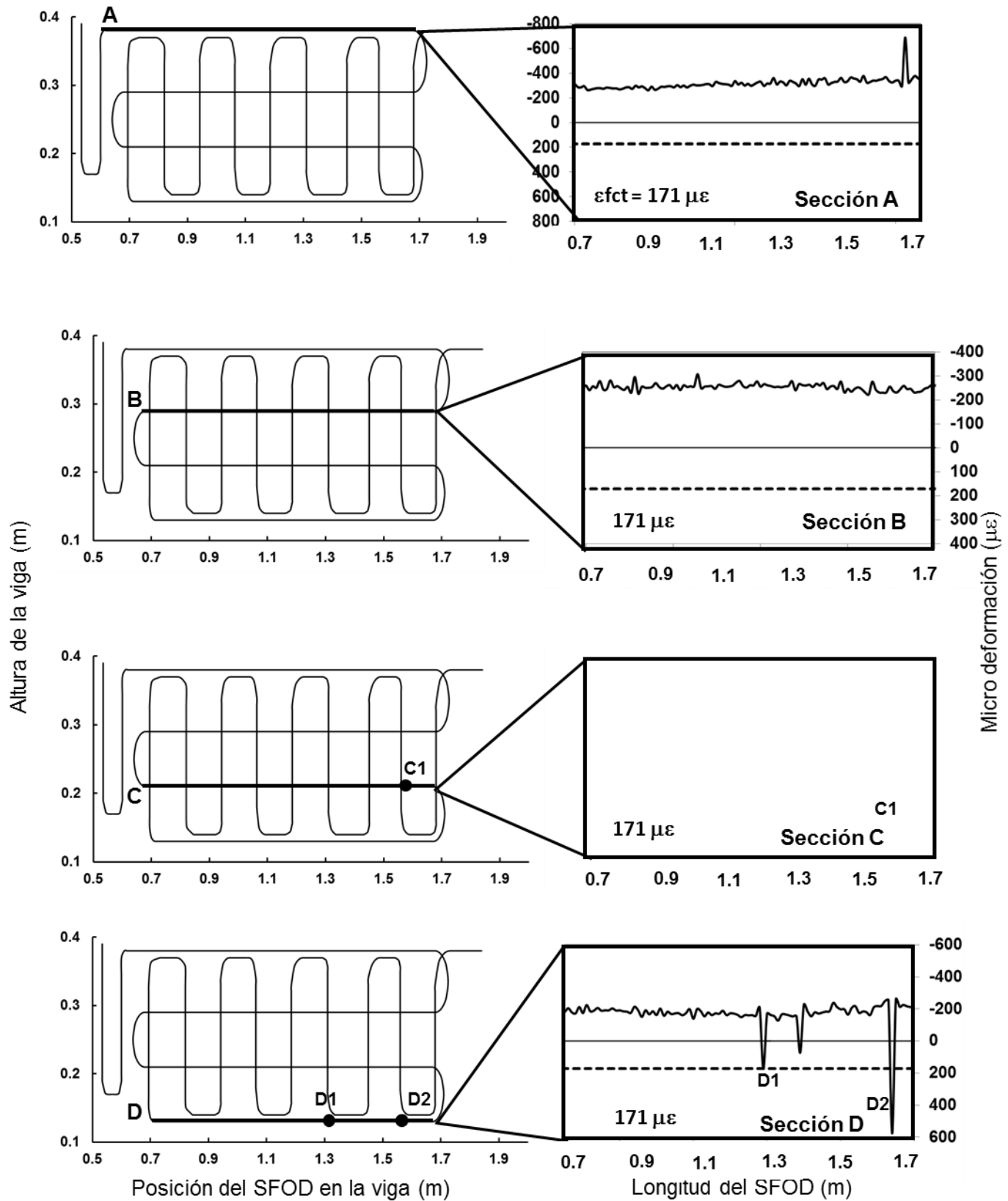


Fig. 6.83 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-3(169 kN).

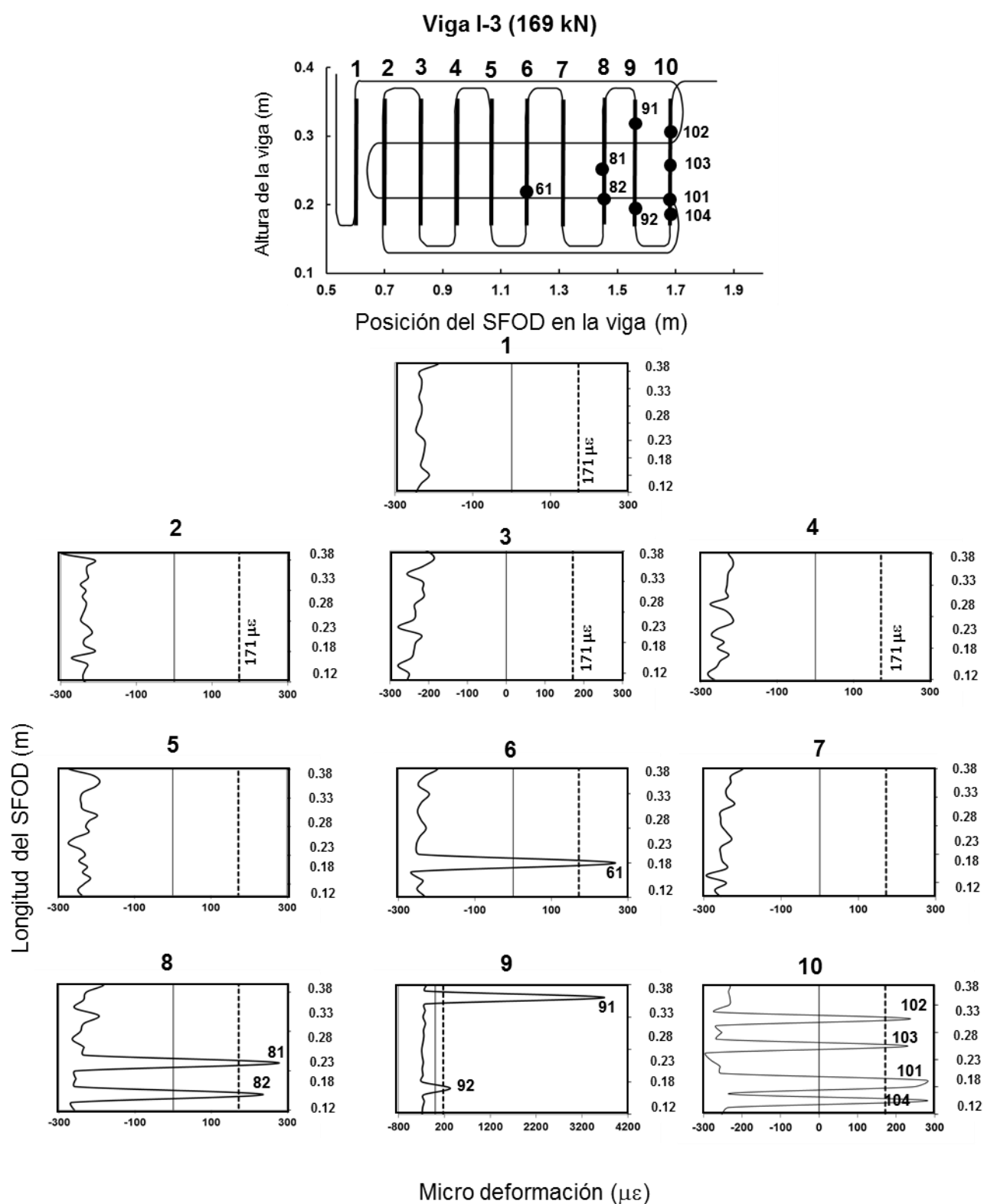


Fig. 6.84 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-3(169 kN).

Viga I-3 (171 kN)

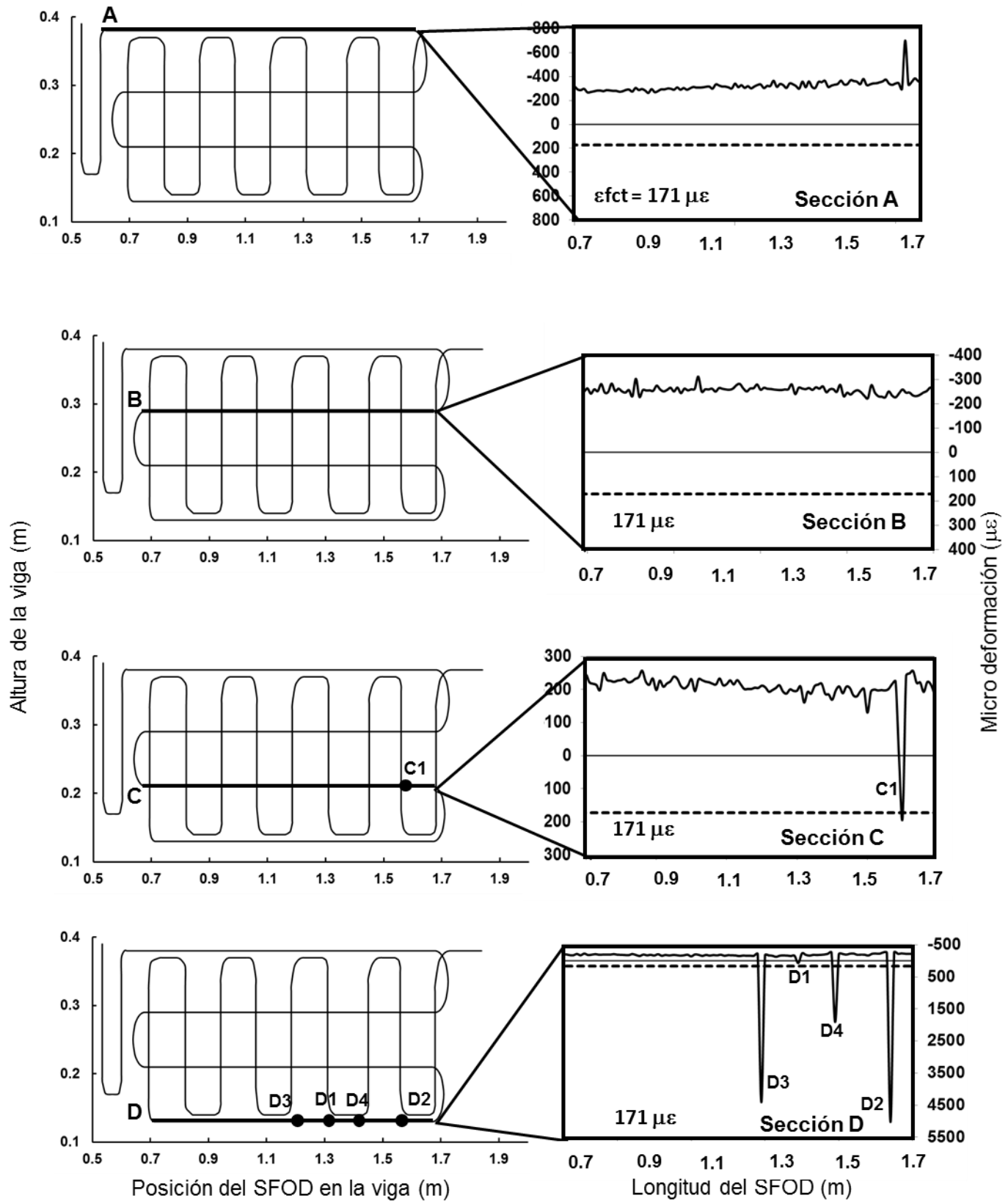


Fig. 6.85 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-3(171 kN).

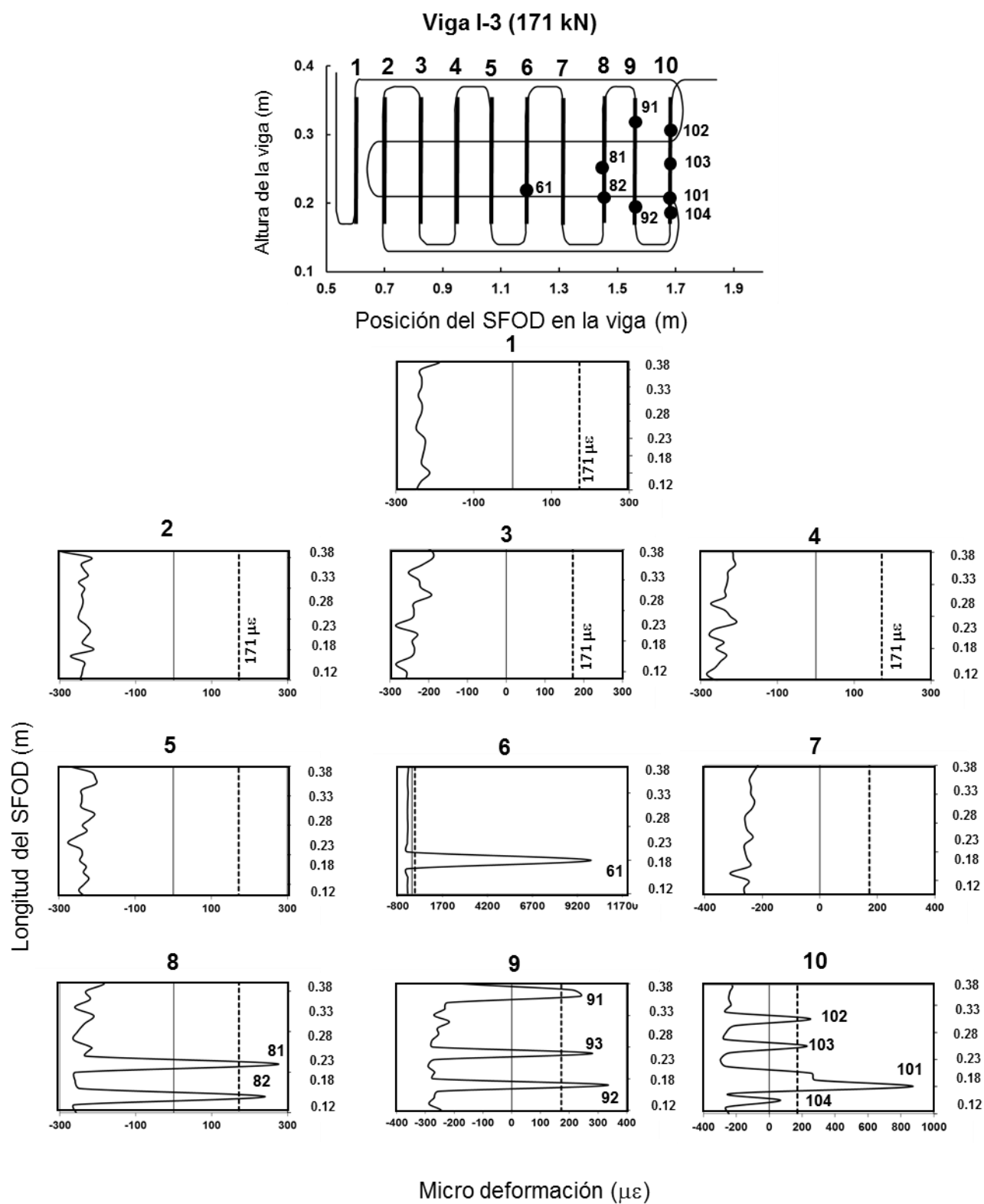


Fig. 6.86 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-3(171 kN).

En las Figs. 6.87 a 6.100 se presentan la distribución de las deformaciones en las diferentes secciones del SFOD1 adherido a la viga I-3 a partir de una carga de 203 kN hasta los 258 kN.

También en las Tablas A.12 y A.13 del anexo se muestran los valores máximos de deformación asociados a los puntos de fisuración localizados para los diferentes niveles de carga analizados.

Se puede observar en la Fig. 6.89 como a un nivel de carga de 207 kN, aparece la primera fisura B1 en la sección B, mientras que en las secciones horizontales inferiores C y D se localizan más puntos de fisuración en forma progresiva. Al igual que en las vigas anteriores, las coordenadas de todos los puntos de fisuración detectados se encuentran en las Tablas 6.24 a 6.35.

Posteriormente en las Figs 6.91 y 6.94 se muestra la distribución de las deformaciones en el alma de la viga I-3 a un nivel de carga hasta los 224 kN. Se observa que aparecen más puntos de fisuración en las secciones C y D, mientras que en la sección B se mantiene una sola fisura.

Con respecto a las secciones verticales, los puntos de fisuración aumentan en forma considerable y se producen en diferentes secciones verticales del SFOD1. Los puntos que indican posibles fisuraciones van ahora de la sección 4 a la sección 10 (Fig. 6.94).

En las Figs. 6.95 a 6.100 se presentan las deformaciones para la viga I-3 correspondientes a los niveles de carga de 232 a 258 kN. A partir de la carga de 232 kN (Fig. 6.95), aparecen los puntos de fisuración B2 y B3. La sección B se mantiene con estos puntos de fisuración hasta la carga de 245 kN. A partir de este nivel de carga aparece en la sección B el punto B4. Posteriormente en el nivel de carga de 258 kN, aparece un punto de fisuración en la sección A del SFOD1.

Con relación a las deformaciones en las secciones verticales, los puntos de fisuración en esta dirección se mantiene entre la sección 4 a 10. A partir del nivel de carga de 245 kN (Fig. 6.98) aparece un punto de fisuración en la sección vertical 3.

Viga I-3 (203 kN)

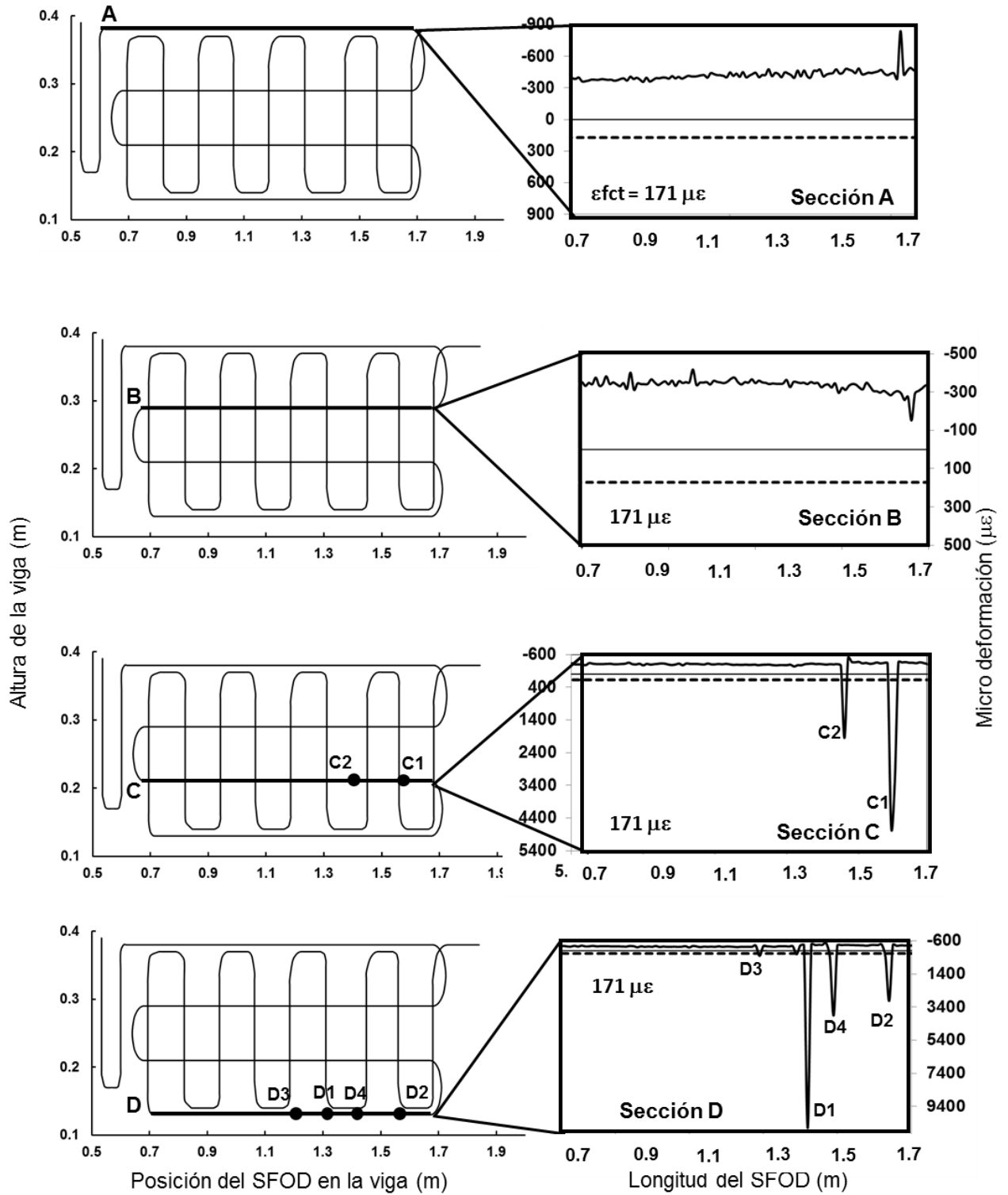


Fig. 6.87 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-3(203 kN).

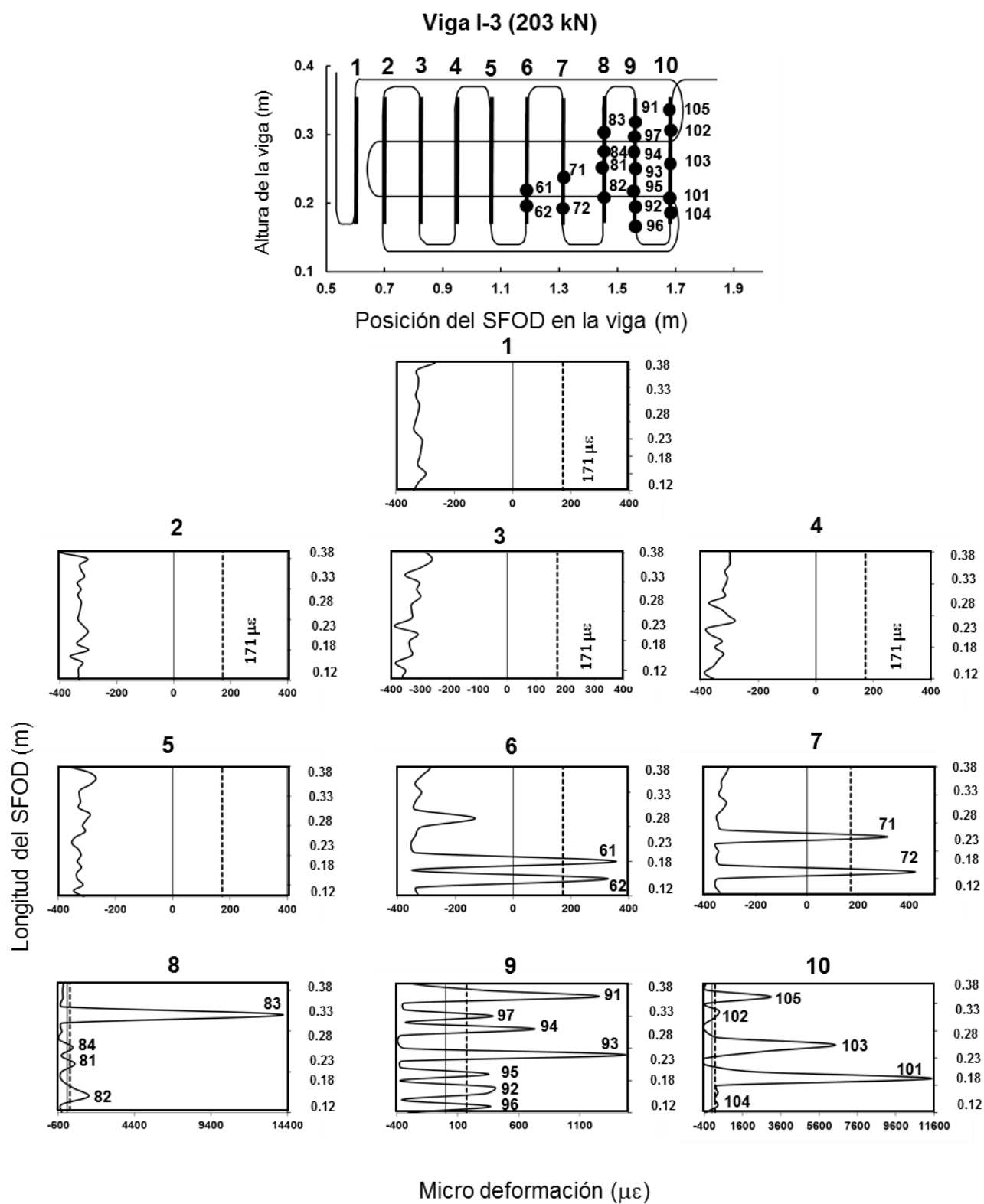


Fig. 6.88 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-2(203 kN).

Viga I-3 (207 kN)

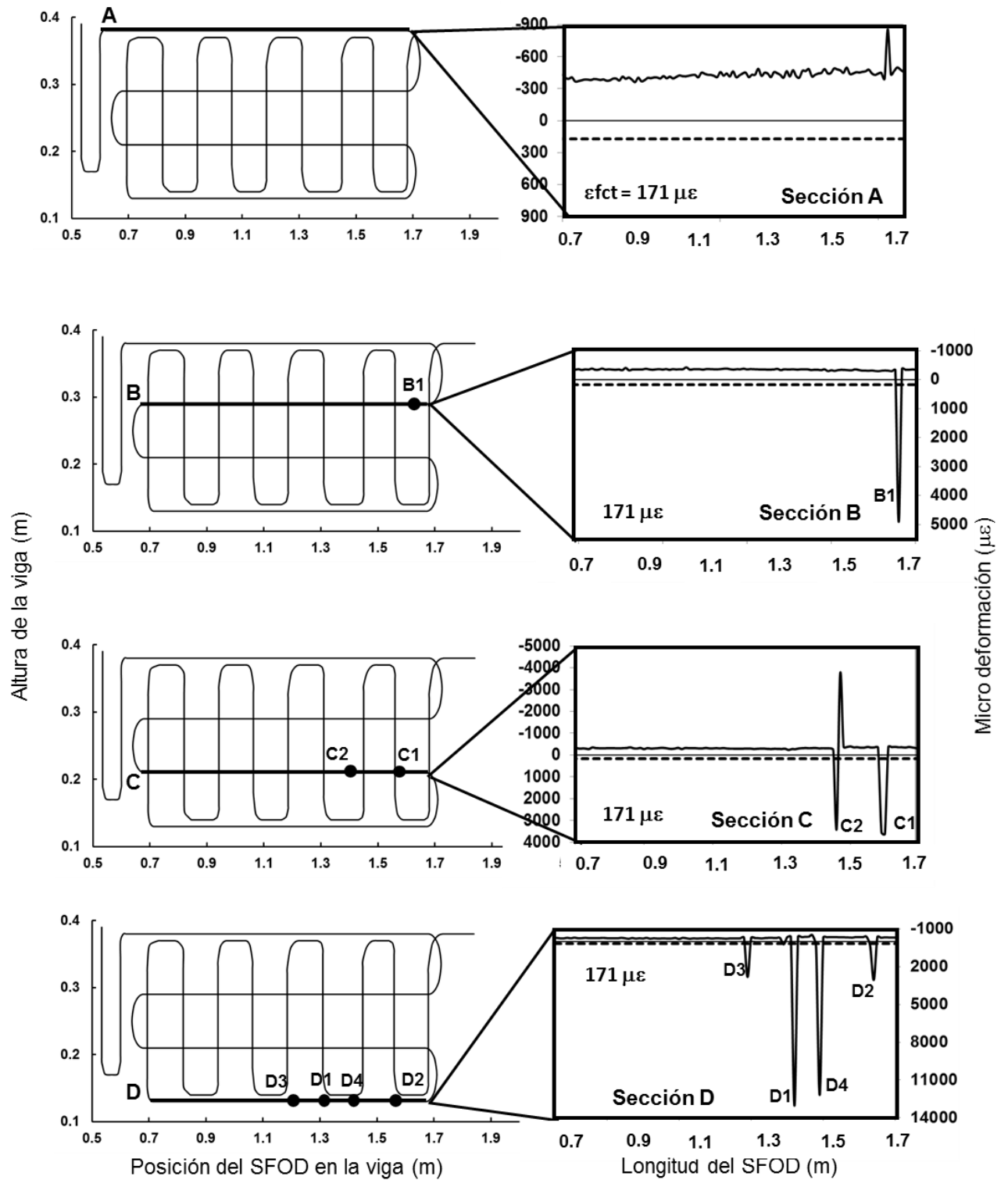


Fig. 6.89 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-3(207 kN).

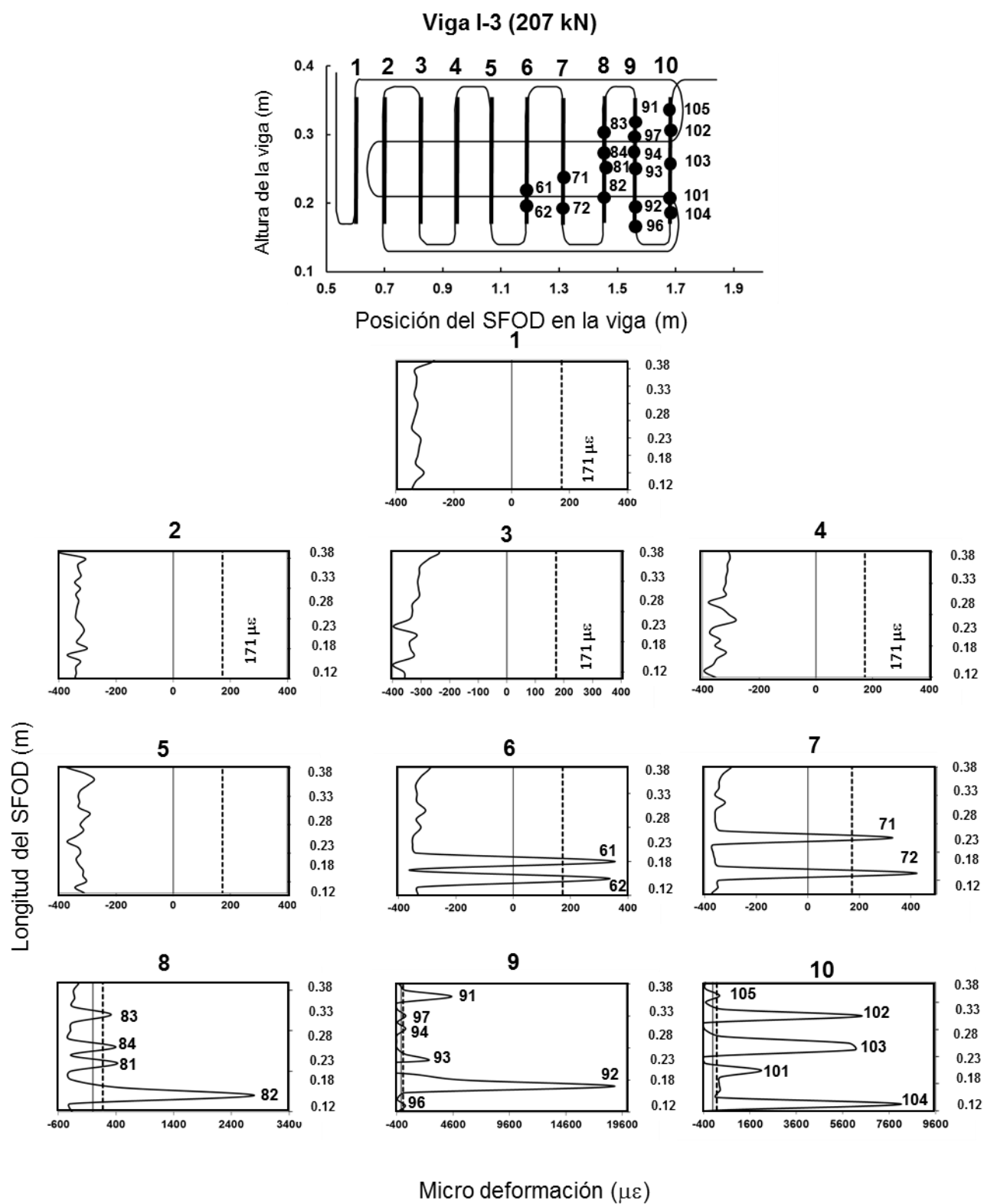


Fig. 6.90 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-2(207 kN).

Viga I-3 (222 kN)

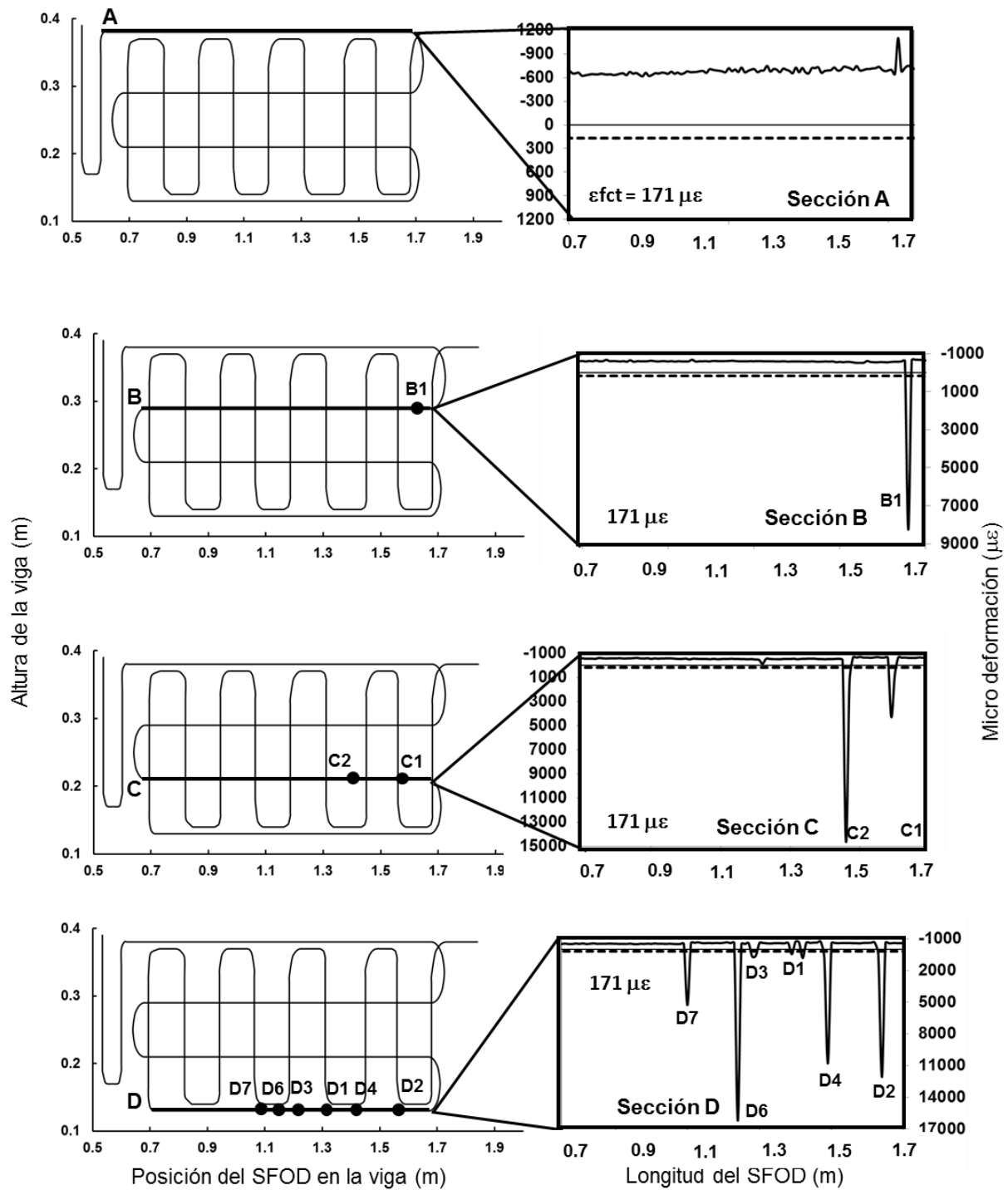


Fig. 6.91 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-3(222 kN).

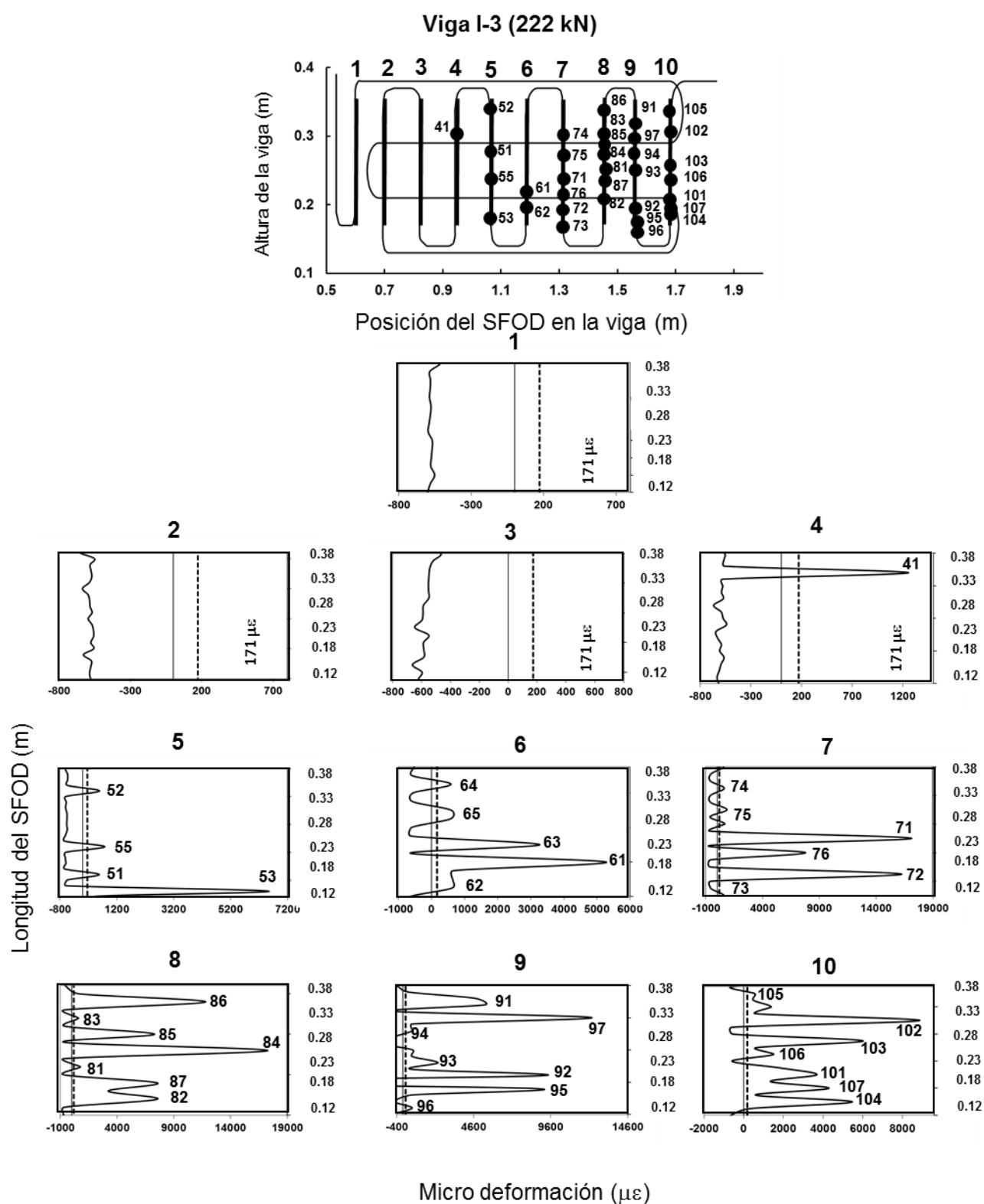


Fig. 6.92 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-2(222 kN).

Viga I-3 (224 kN)

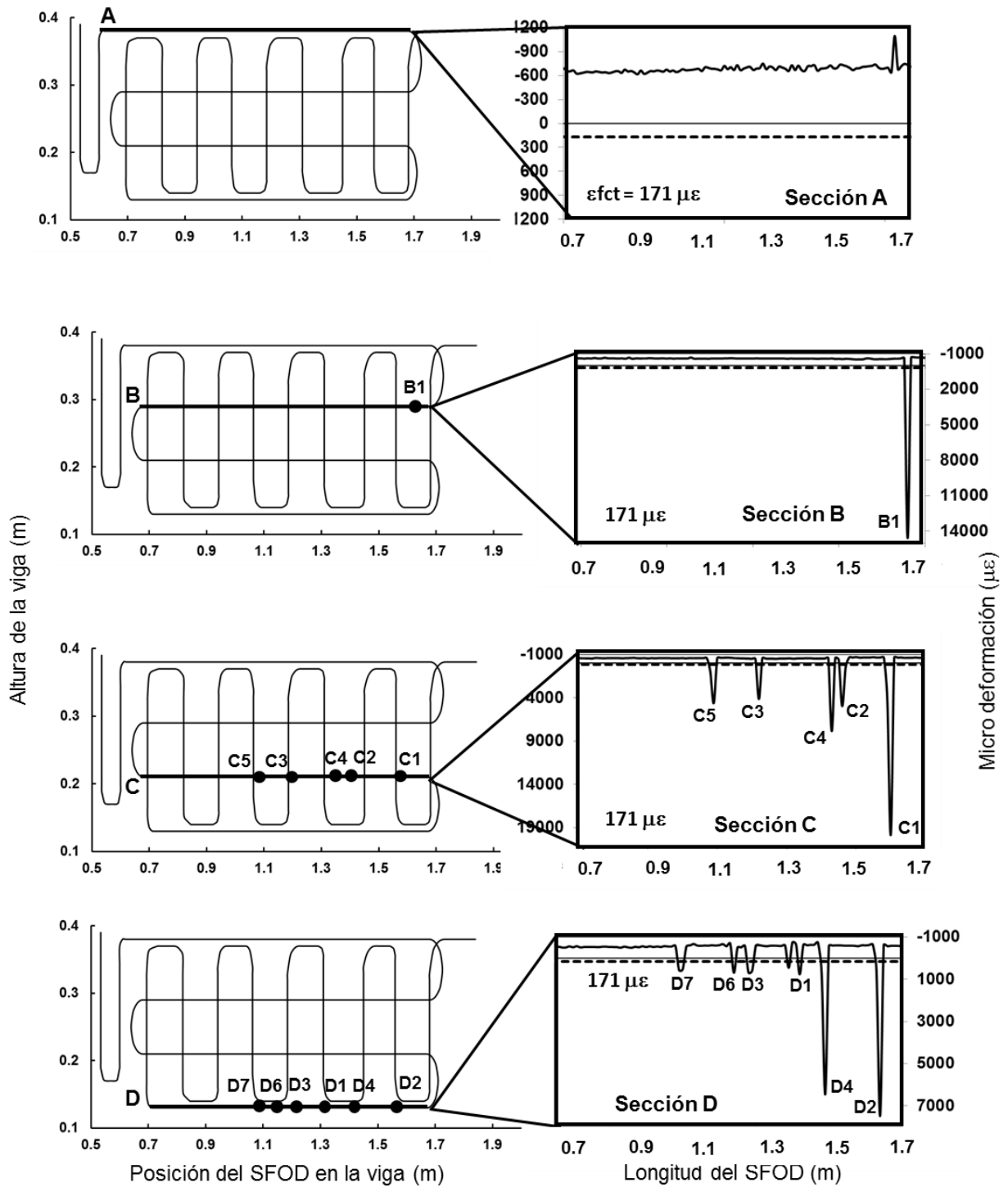


Fig 6.93 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-3(224 kN).

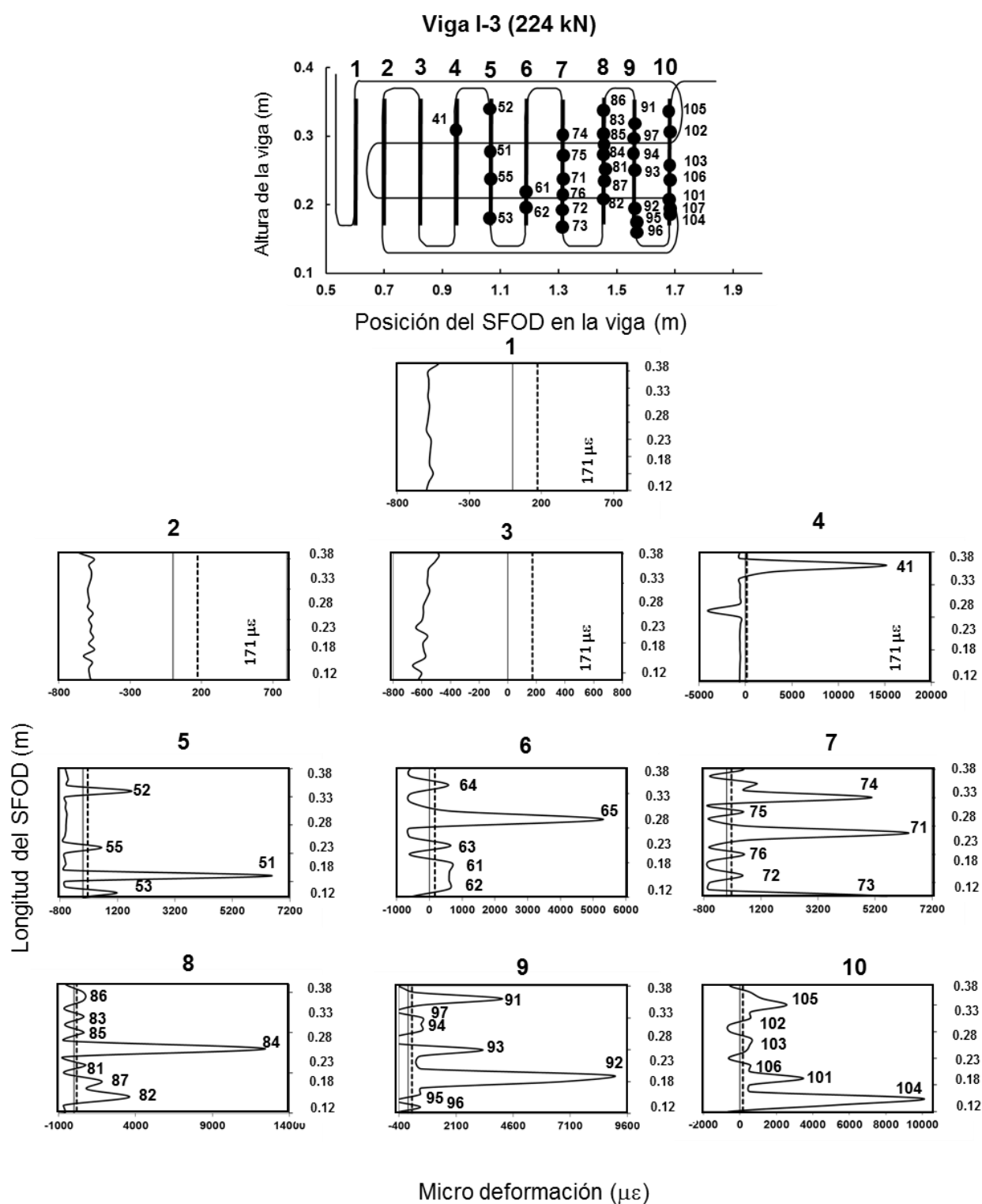


Fig. 6.94 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-2(224 kN).

Viga I-3 (232 kN)

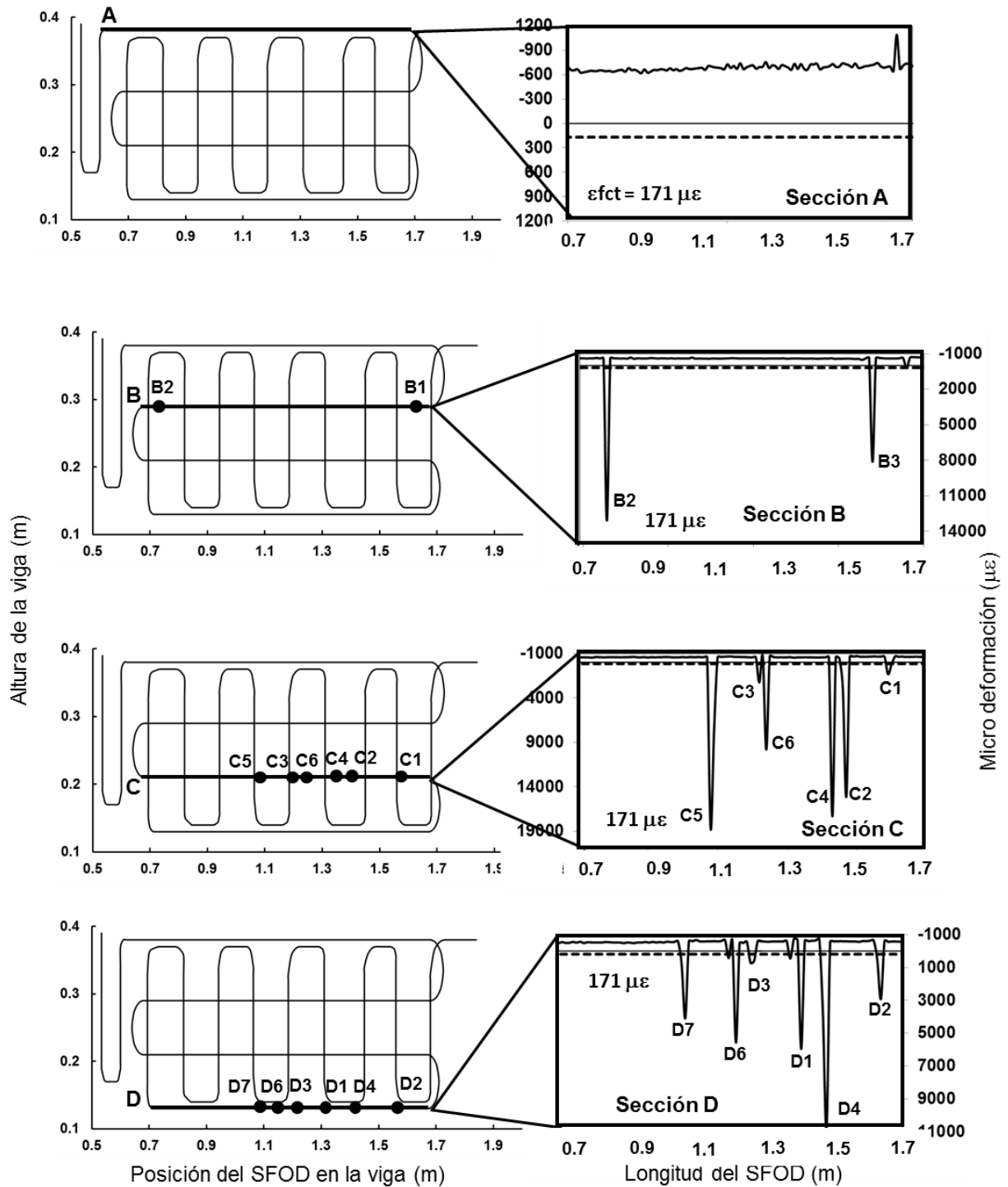


Fig. 6.95 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-3(232 kN).

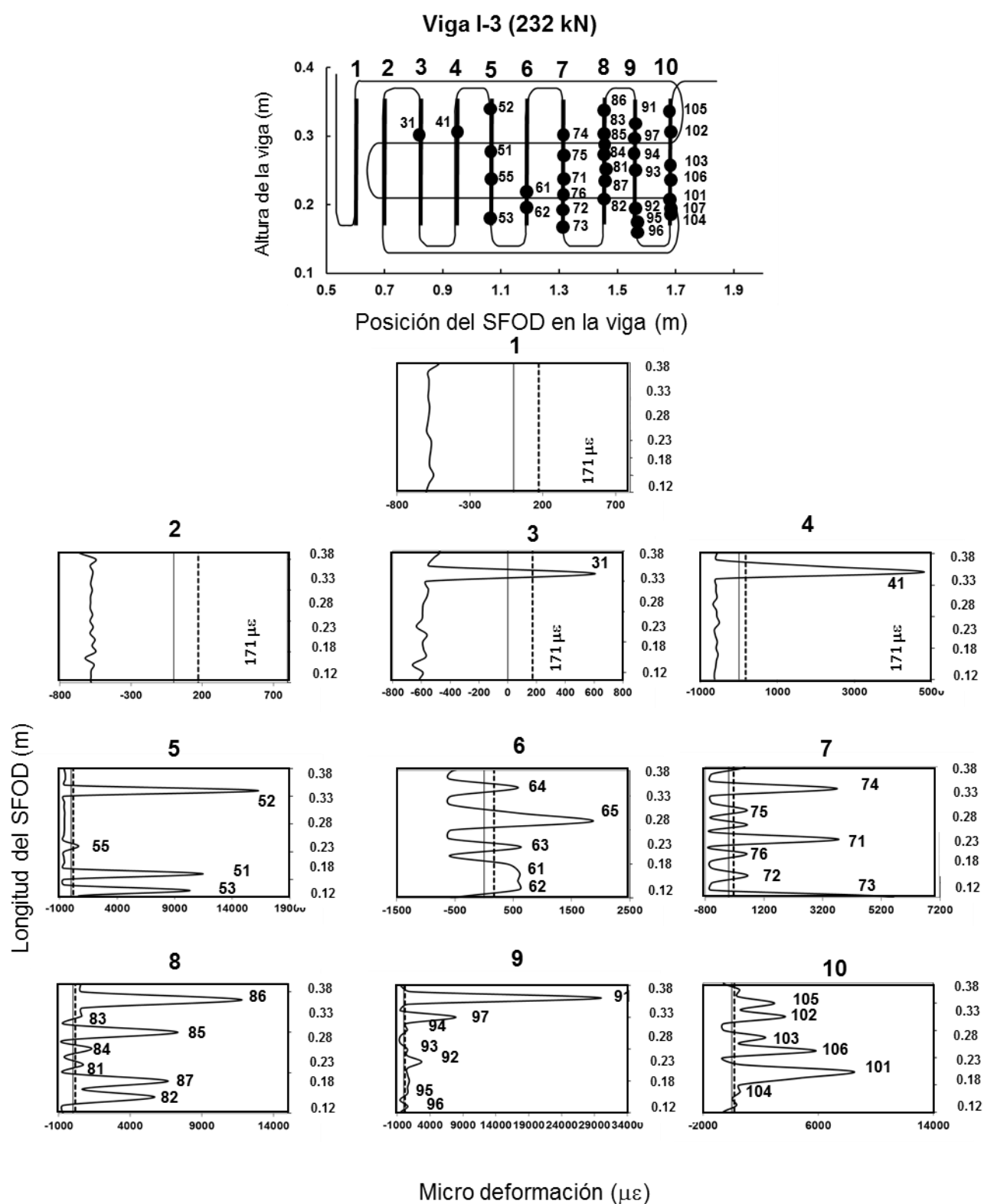


Fig. 6.96 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-3(232 kN).

Viga I-3 (245 kN)

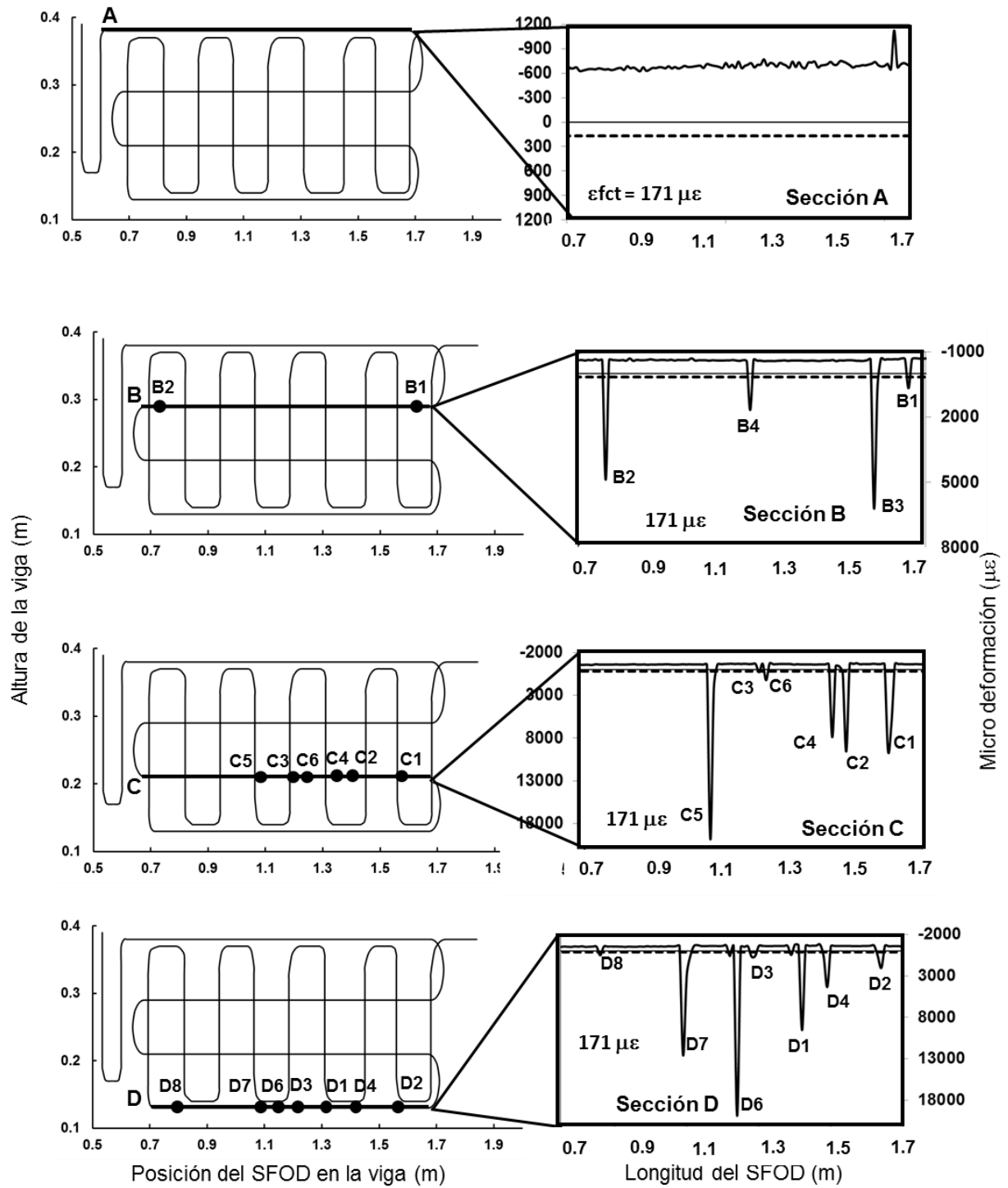


Fig. 6.97 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-3(245 kN).

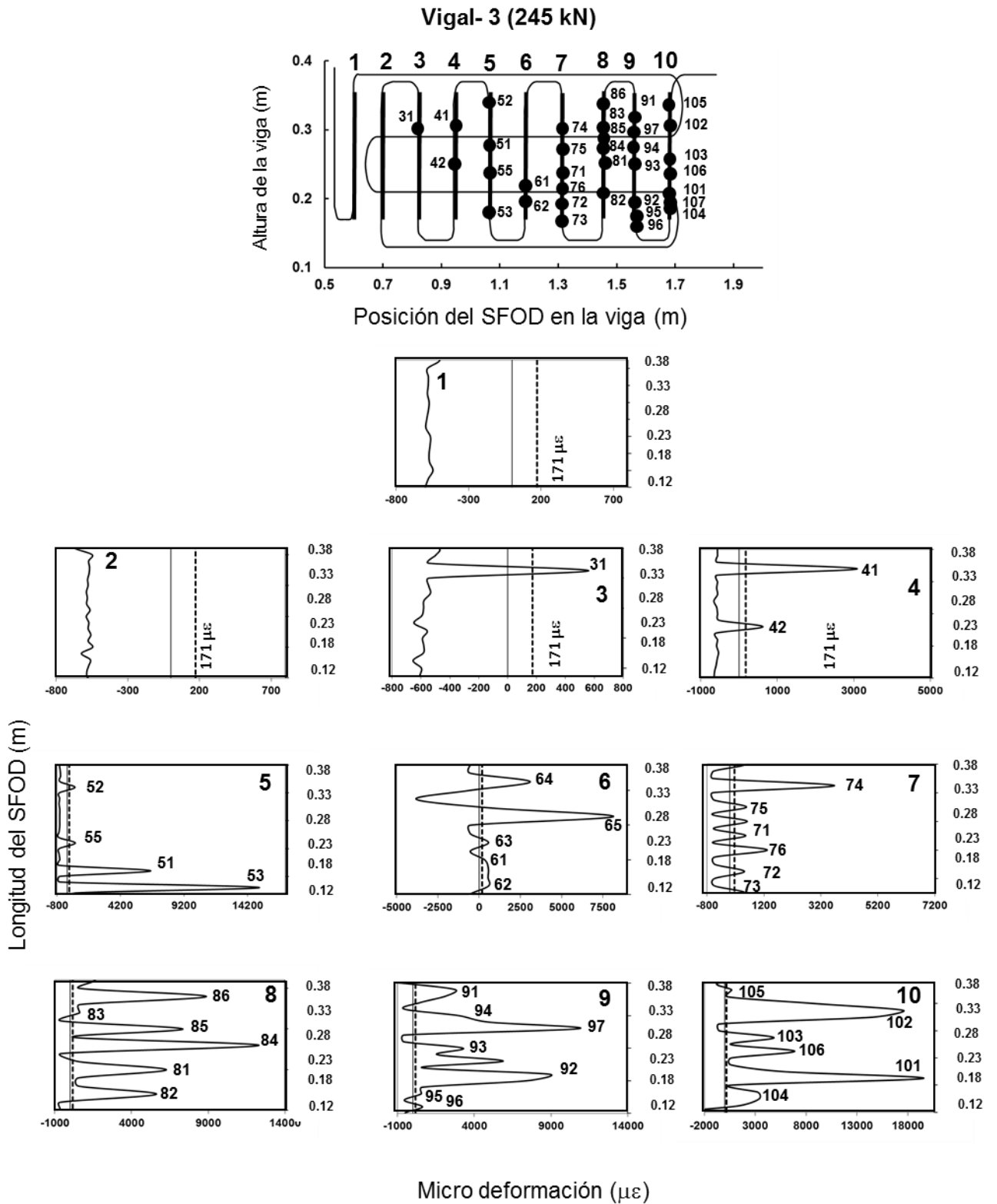


Fig. 6.98 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-3(245 kN).

Viga I-3 (258 kN)

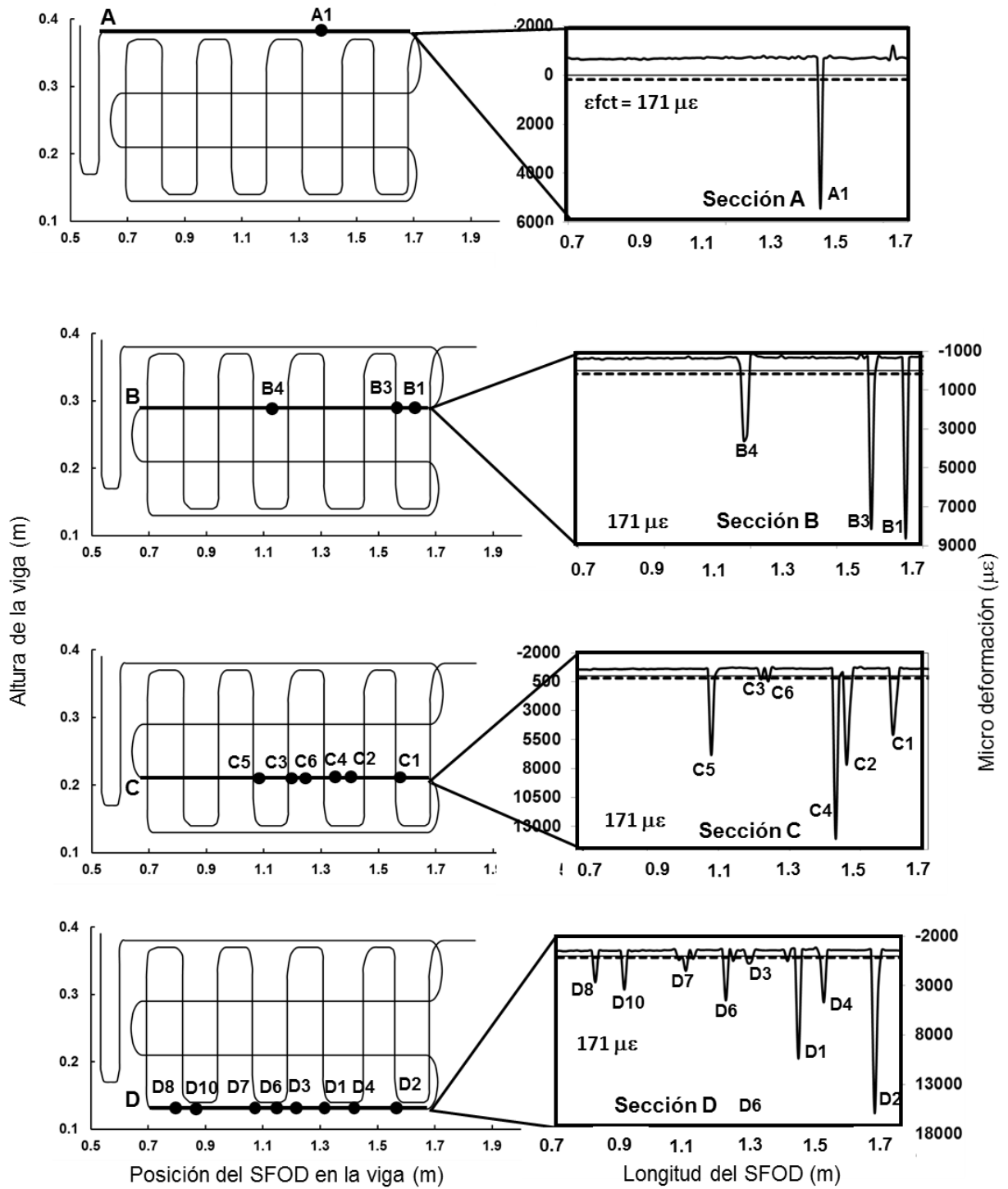


Fig. 6.99 Deformaciones en las secciones A, B, C y D del SFOD1 en la viga I-3(258 kN).

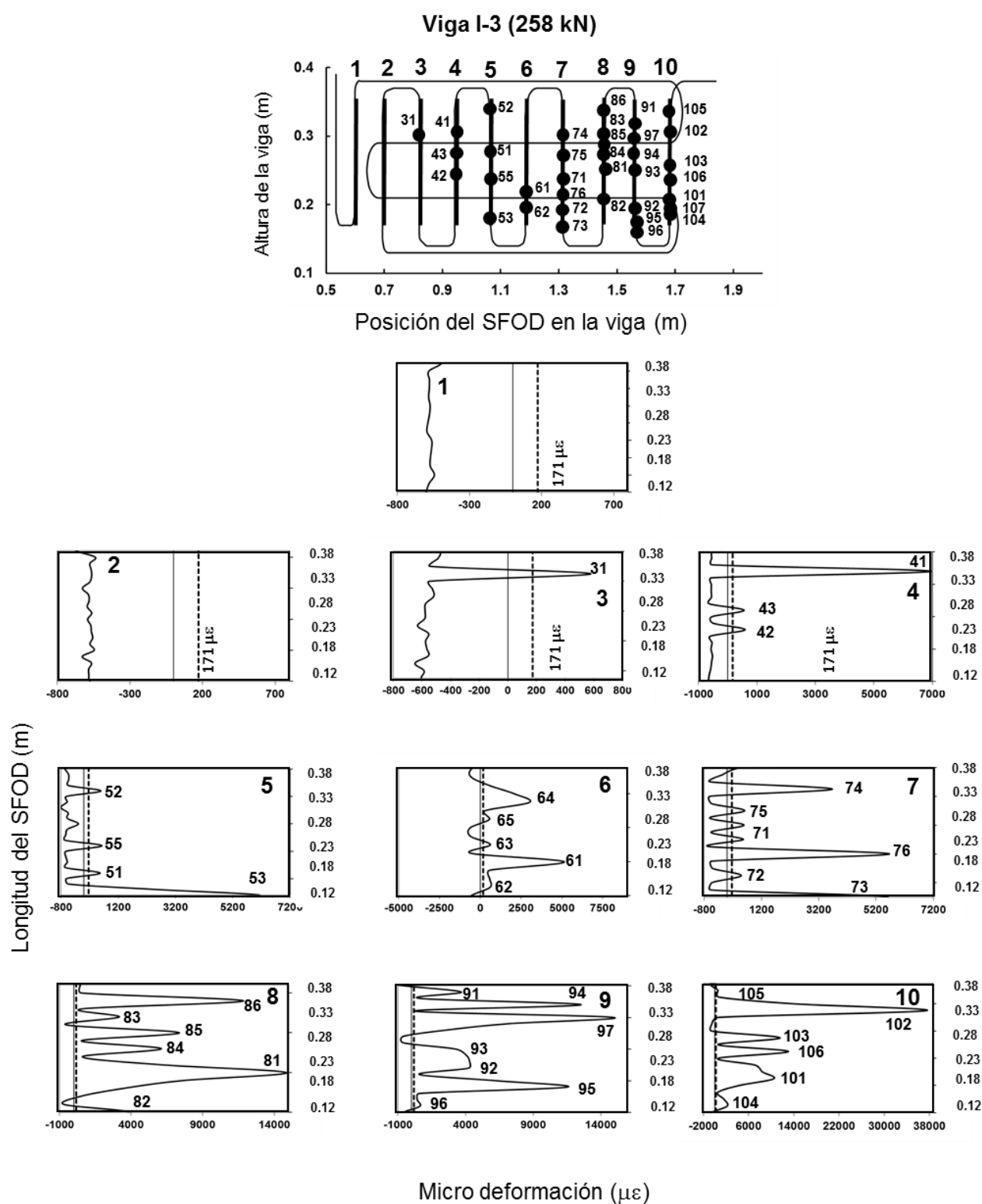


Fig. 6.100 Deformaciones en las secciones verticales 1 a 10 del SFOD1 en la viga I-3(258 kN).

6.2.5 Identificación de patrones de fisuración por cortante mediante los SFOD

En esta sección se muestra una serie de patrones de fisuración que se pudieron obtener gracias a la instalación de un SFOD en el alma de cada una de las vigas durante los tres ensayos. Su obtención se ha basado en los resultados previamente mostrados en las secciones 6.2.3 y 6.2.4. Su comprobación se realiza en la medida de lo posible, con una serie de fotografías que se realizaron durante cada uno de los ensayos.

6.2.5.1 Viga I-1

En las Figs. 6.101 a 6.104 se muestran los patrones de fisuración asociados a los mismos niveles de carga que se han analizado en la sección anterior 6.2.4. Estas figuras muestran en la parte izquierda la malla 2D conformada por el SFOD adherido al alma de la viga I-1. En esta malla y conforme el nivel de carga aumenta, se traza el patrón de fisuración correspondiente.

En forma complementaria, en la parte derecha de estas figuras se indica el nivel de carga correspondiente al patrón de fisuración que se traza al unir distintos puntos localizados en las secciones A, B, C y D.

En la Fig. 6.101 se aprecia, a un nivel de carga de 94 kN, el inicio de una primera fisura en la región instrumentada del alma de la viga. Posteriormente y para mayores niveles de carga, las Figs 6.102 a 6.104 muestran la evolución de esta primera fisura, junto con el trazo de otras fisuras. Finalmente en la parte baja de la Fig. 6.104, se observa el trazo del patrón de fisuración en el alma de la viga I-1 correspondiente a 262 kN de carga.

El trazo de los patrones de fisuración mostrados en las figuras anteriores, se realizó con base en un levantamiento fotográfico llevado a cabo durante la realización del ensayo de la viga, y con fotografías en las cuales, las fisuras eran evidentes a la vista.

VIGA I-1

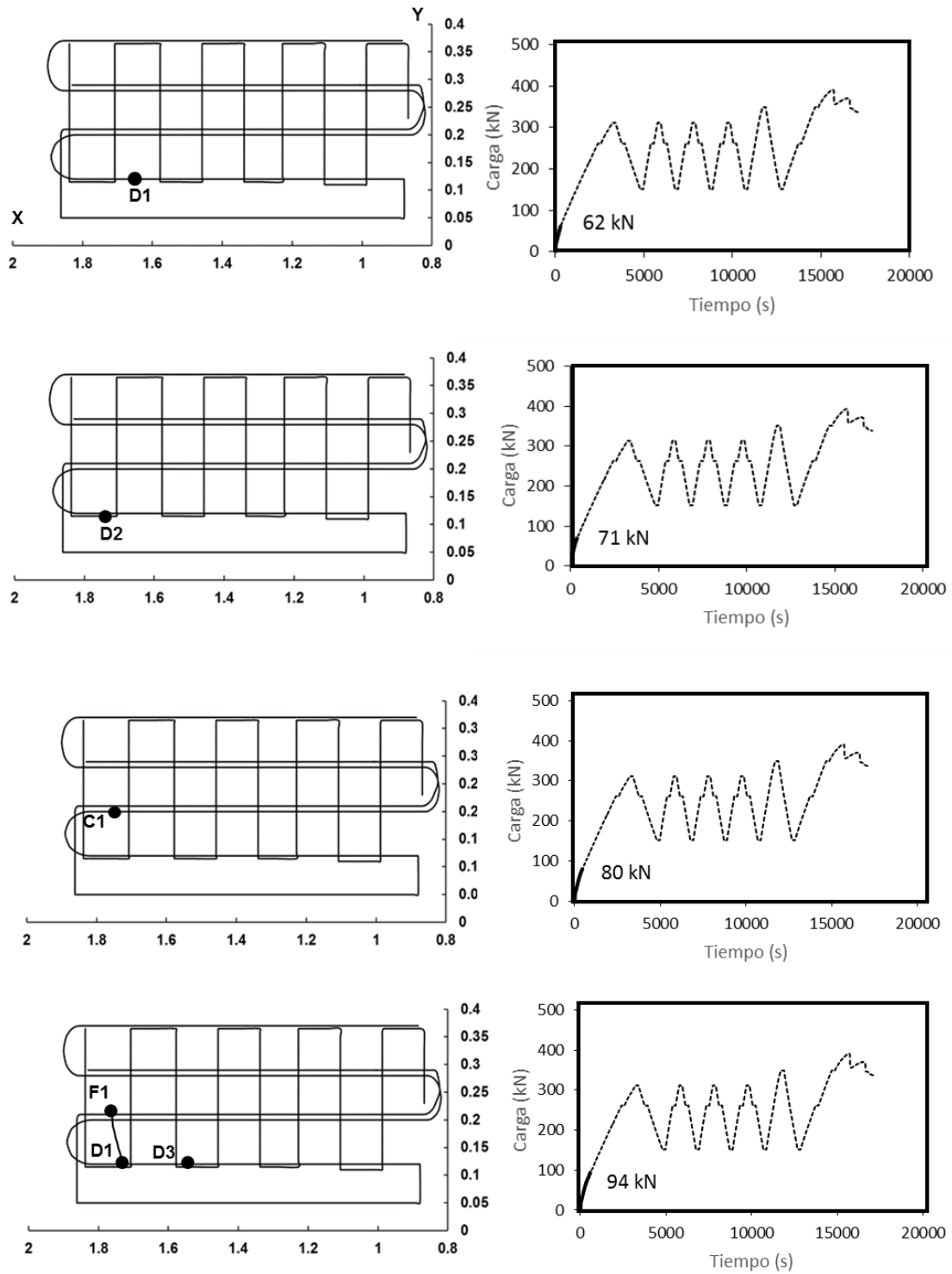


Fig. 6.101 Patrones de fisuración de la viga I-1 (62 a 94 kN)

VIGA I-1

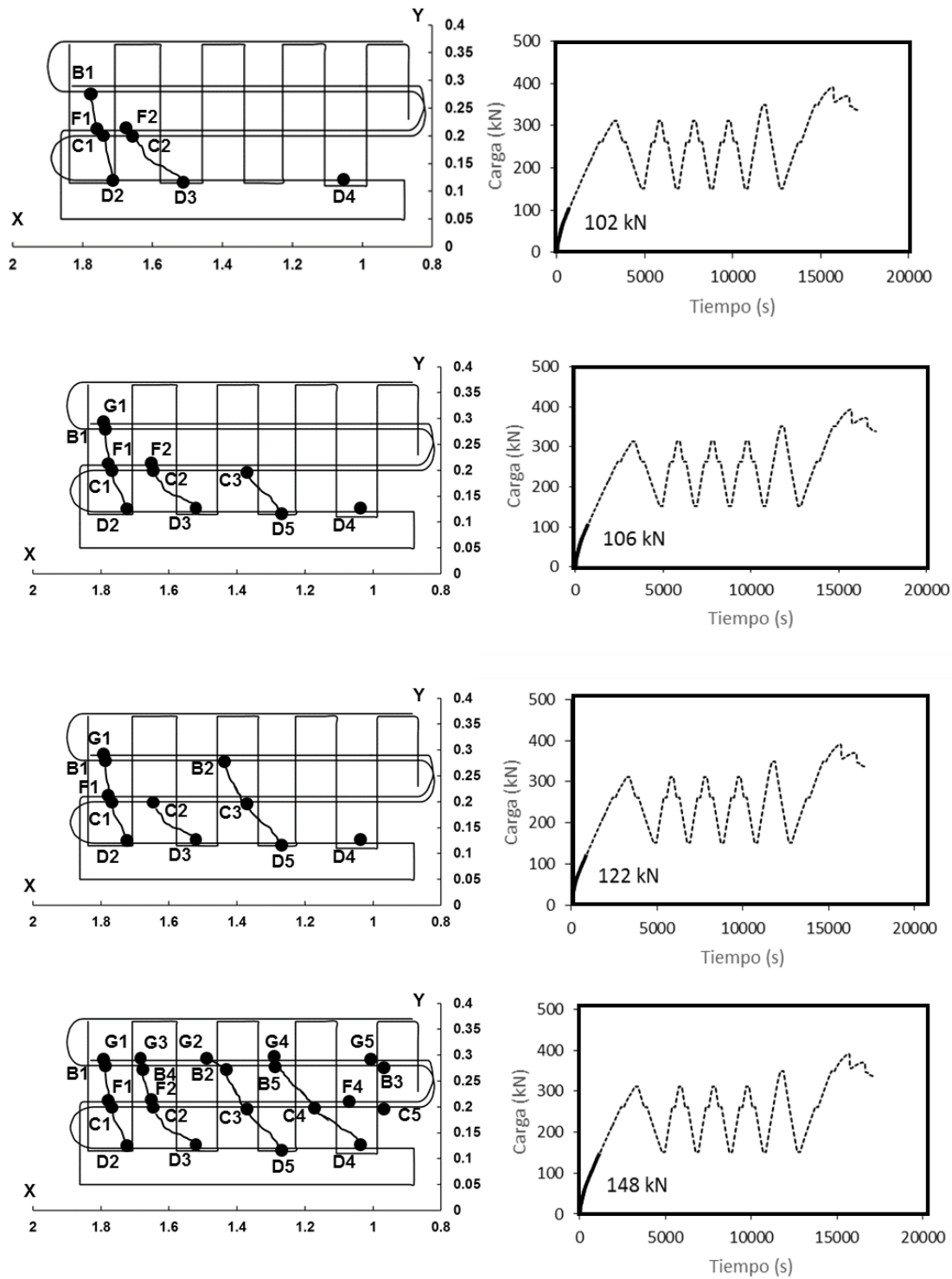


Fig. 6.102 Patrones de fisuración de la viga I-1 (102 a 148 kN)

VIGA I-1

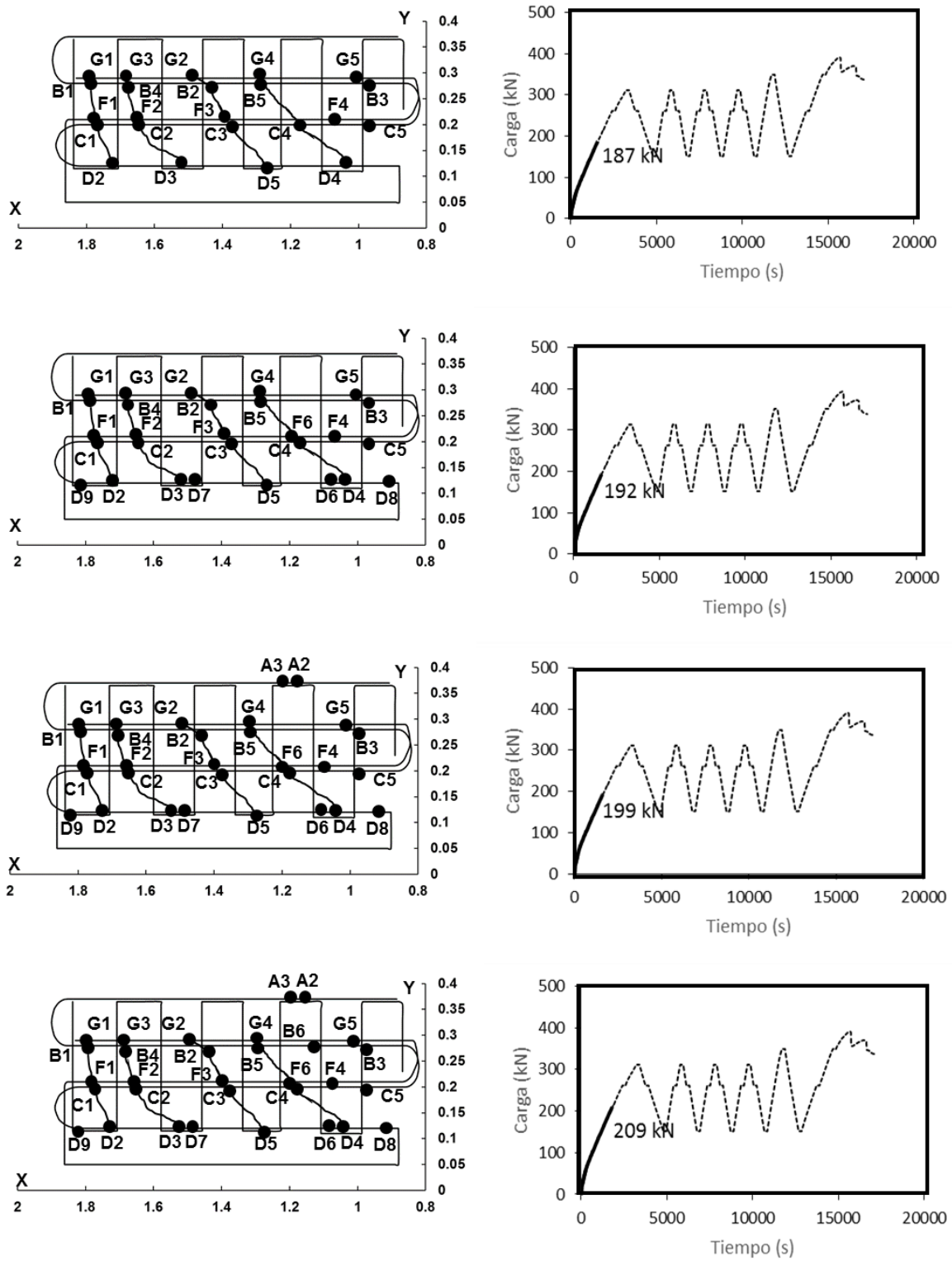


Fig. 6.103 Patrones de fisuración de la viga I-1 (187 a 209 kN)

VIGA I-1

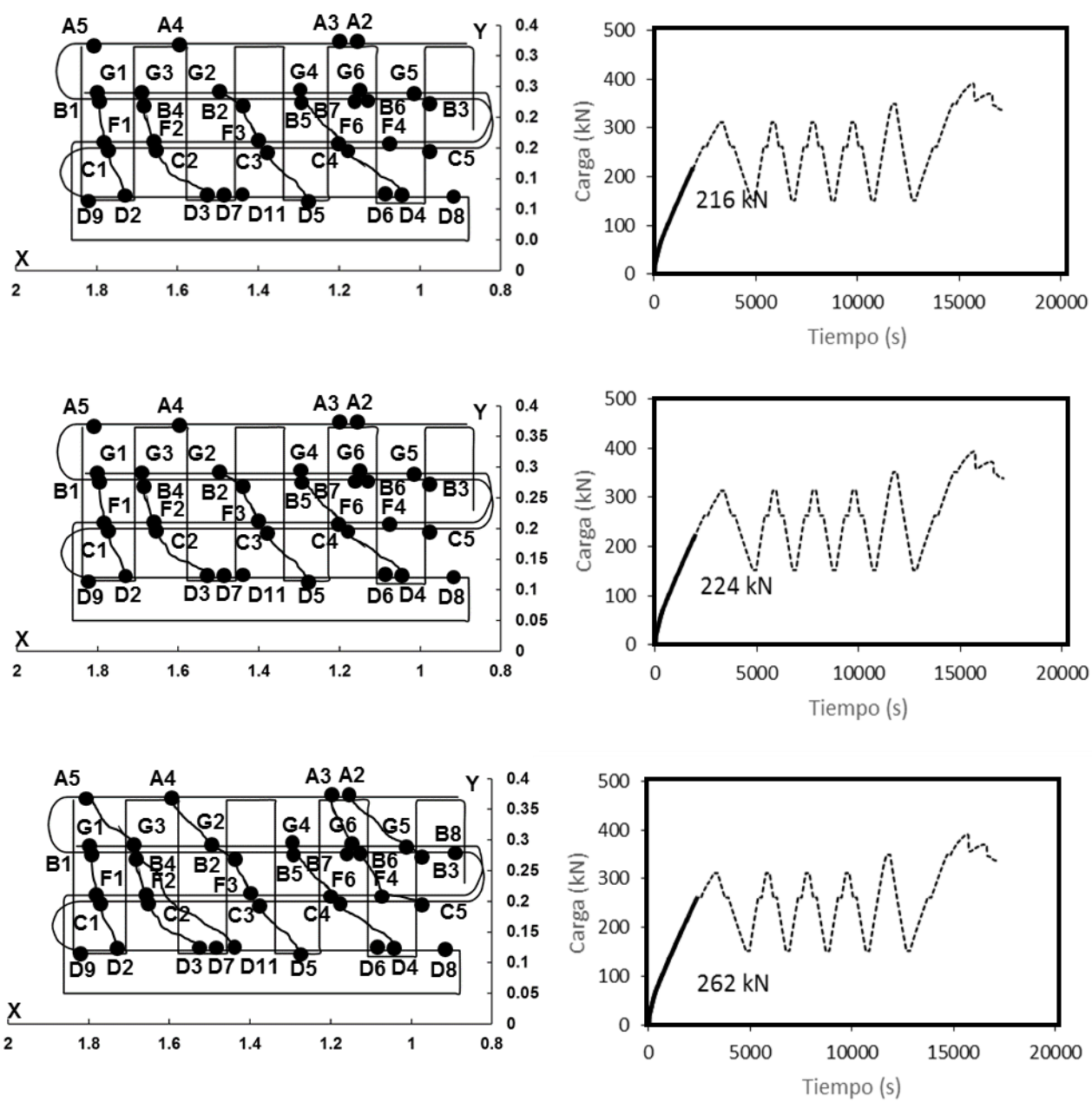


Fig. 6.104 Patrones de fisuración de la viga I-1 (216 a 262 kN)

En las Figs. 6.105 y 6.106 se comparan algunos de los patrones de fisuración trazados con la información obtenida del sistema OBR, y las fisuras captadas por inspección visual durante la realización del ensayo I-1 a un nivel de carga de 187 kN. En general existe una buena correspondencia entre los patrones de fisuración por cortante reales y los trazados con la información del sistema OBR. Lo anterior es un buen indicativo del potencial del sistema OBR para obtener información respecto a la distribución de la fisuración por cortante en un elemento sujeto a este tipo de esfuerzos.

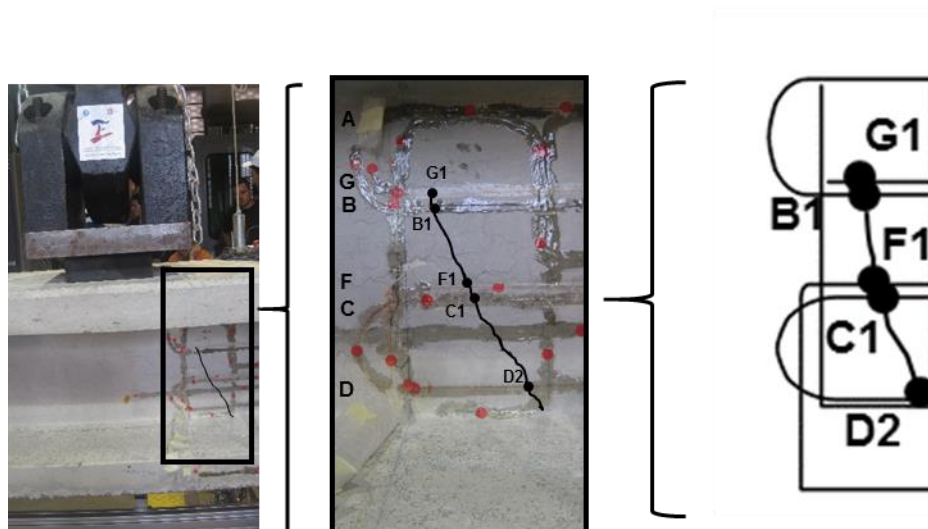


Fig. 6.105 Comparación entre una fisura real por cortante y una replanteada con la información del DSOF en el ensayo de la viga I-1 para una carga de 187 kN

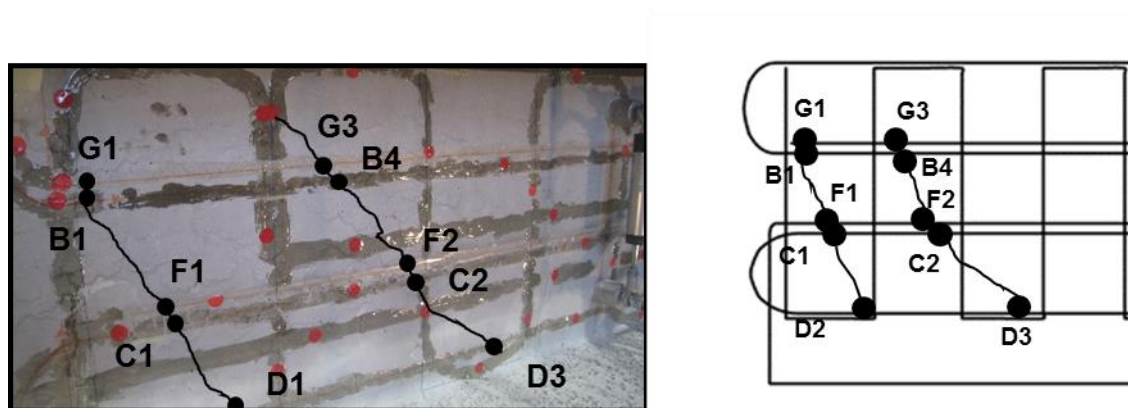


Fig. 6.106 Conformación del patrón real de fisuración y el calculado en el ensayo la viga I-1 a una carga de 187 kN

6.2.5.2 Viga I-2

En las Figs. 6.107 a 6.109 se muestran los patrones de fisuración calculados para la viga I-2. En el trazo de estos patrones, se contó con información de puntos de fisuración tanto horizontal como vertical.

Estos patrones se conforman con la unión de los puntos de fisuración a partir de los 67 kN, pero es con un nivel de carga de 95 kN que se pueden unir puntos de fisuración entre las secciones D y C, para trazar el inicio de las fisuras que conforman el patrón de fisuración de la viga I-2 (Fig. 6.107).

En la Fig. 6.108 entre los niveles de carga de 100 a 142 kN, se puede observar más claramente la forma en la que se van formando las diferentes fisuras a cortante en el alma de la viga I-2. Cabe mencionar que a estos niveles de carga resultó difícil distinguir visualmente la presencia de las fisuras que se muestran en esta figura.

La Fig. 6.109 describe la conformación del patrón de fisuración para el alma de la viga I-2 a niveles de carga entre los 203 kN y los 260 kN. Para estos niveles, la fisuración ya resultaba muy evidente visualmente y se puede comparar con los valores obtenidos del OBR

Comparativamente con la viga I-1, para un nivel de carga similar entre 260 y 262 kN, la viga I-2 mostraba un nivel de fisuración mayor que la primera (Fig. 6.104).

En el trazo de los patrones de fisuración de esta viga, el apoyo del registro fotográfico se utilizó para definir de una mejor manera los puntos a través de los cuales se conformaron las diferentes fisuras. Lo anterior, sobre todo en las secciones verticales, las cuales en algunas ocasiones presentaron una serie de puntos de fisuración muy cercanos entre sí.

En estas figuras se trazaron los puntos correspondientes a las secciones horizontales con un punto relleno de color negro, mientras que los puntos correspondientes a las secciones verticales, se han trazado con un punto sin relleno.

Lo anterior se puede observar a partir de la Fig. 6.109, a un nivel de carga de 115 kN, que es el nivel en el cual comenzó a aparecer el primer punto de fisuración en la sección vertical 9.

VIGA I-2

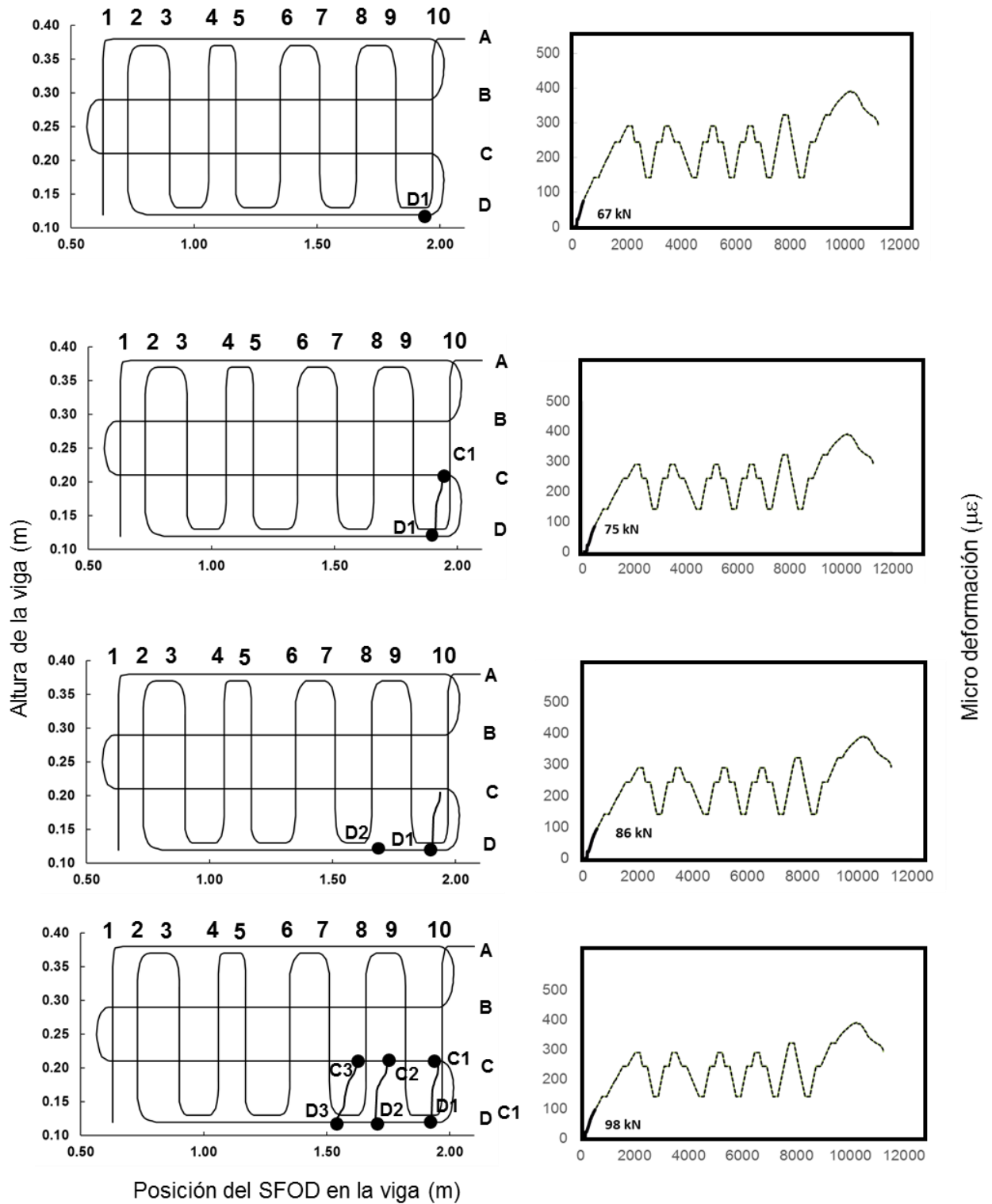


Fig. 6.107 Patrones de fisuración de la viga I-2 (67 a 98 kN)

VIGA I-2

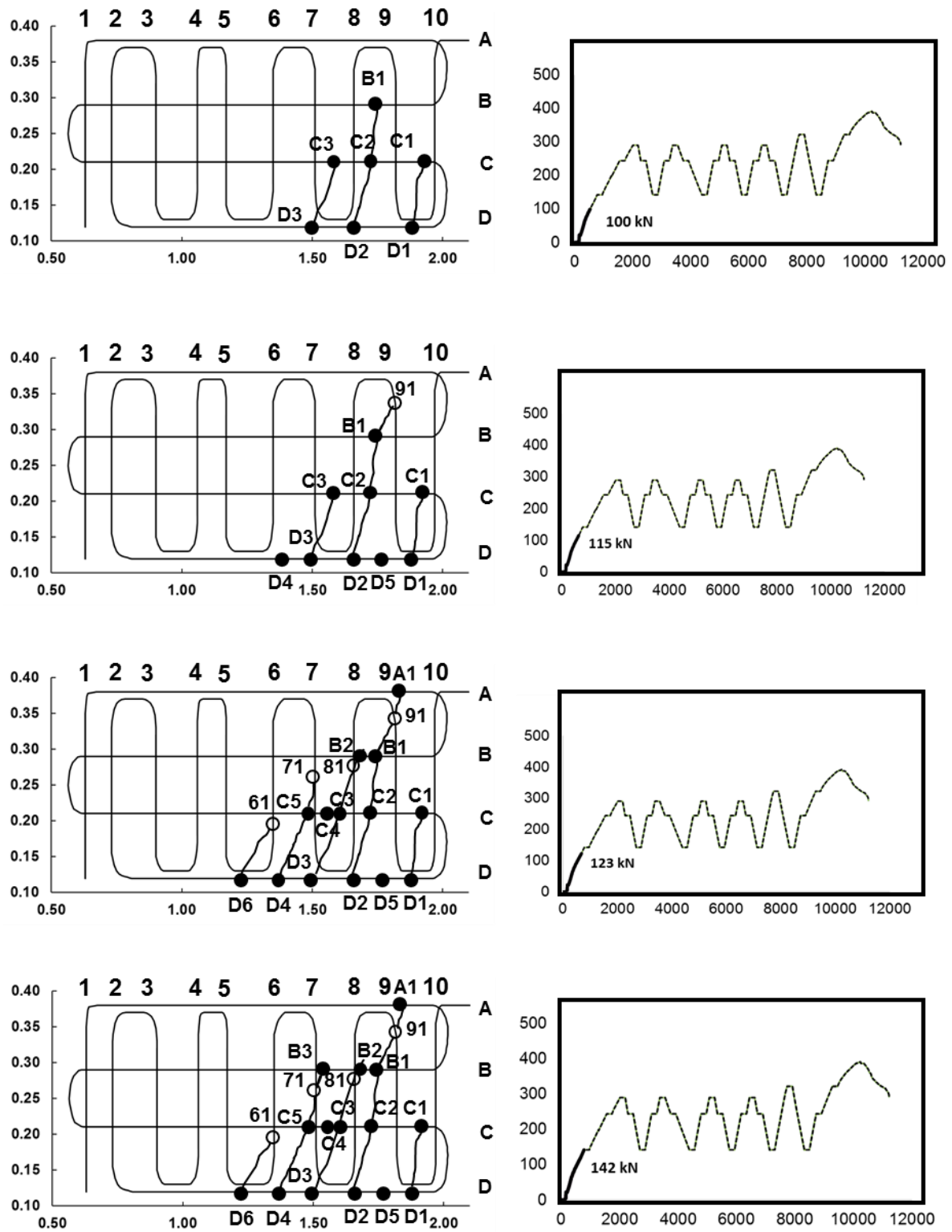


Fig. 6.108 Patrones de fisuración de la viga I-2 (100 a 142 kN)

VIGA I-2

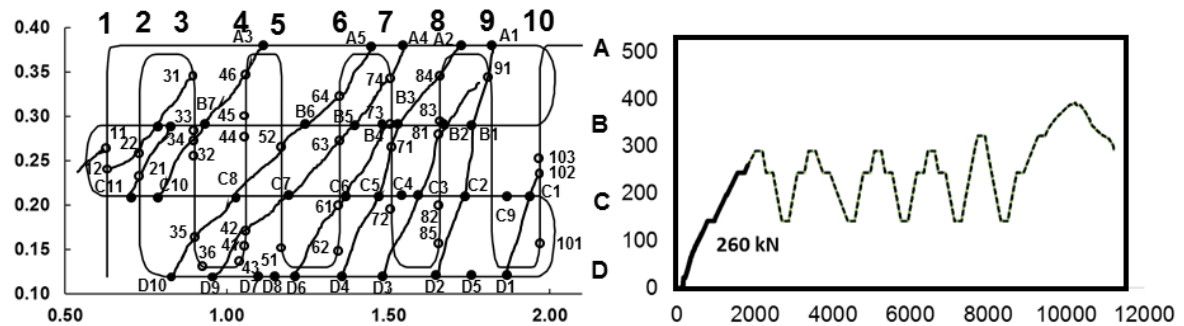
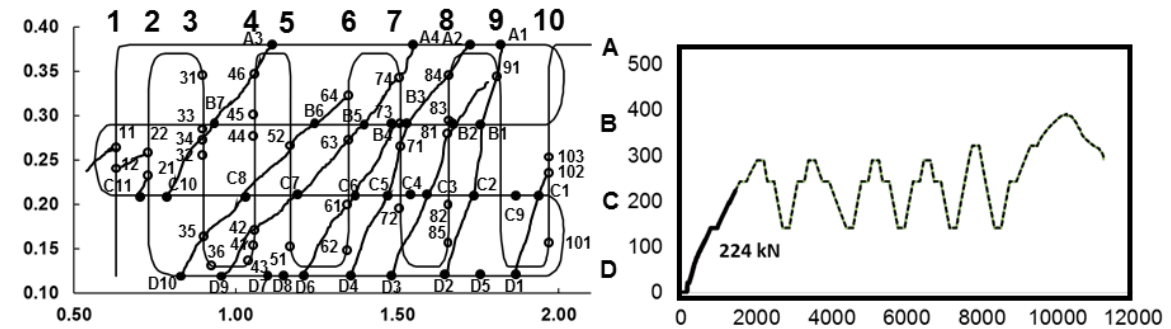
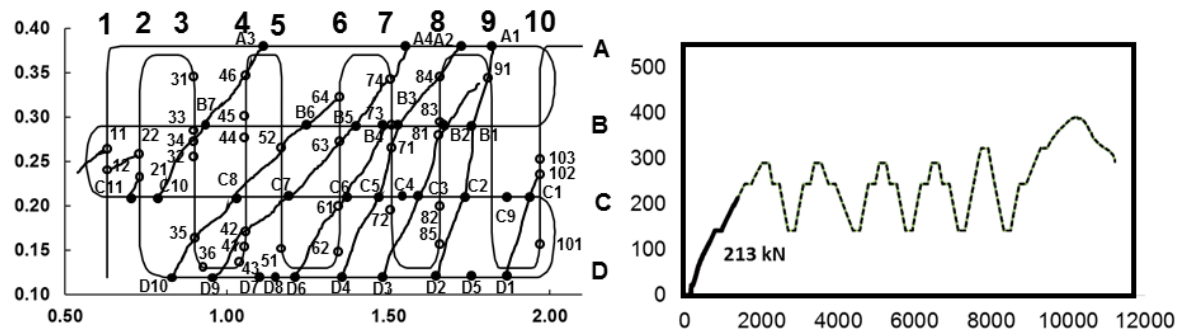
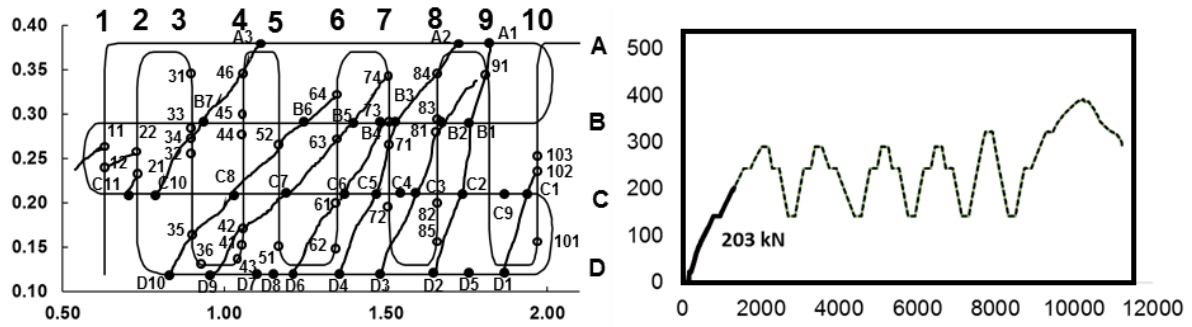


Fig. 6.109 Patrones de fisuración de la viga I-2 (203 a 260 kN)

En la Fig. 6.110 se compara el patrón de fisuración real con el patrón de fisuración calculado con los puntos de deformación máxima en las diferentes secciones del SFOD1 adherido al alma de la viga I-2. El patrón de fisuración que de esta figura corresponde a un nivel de carga cercano a los 203 kN.

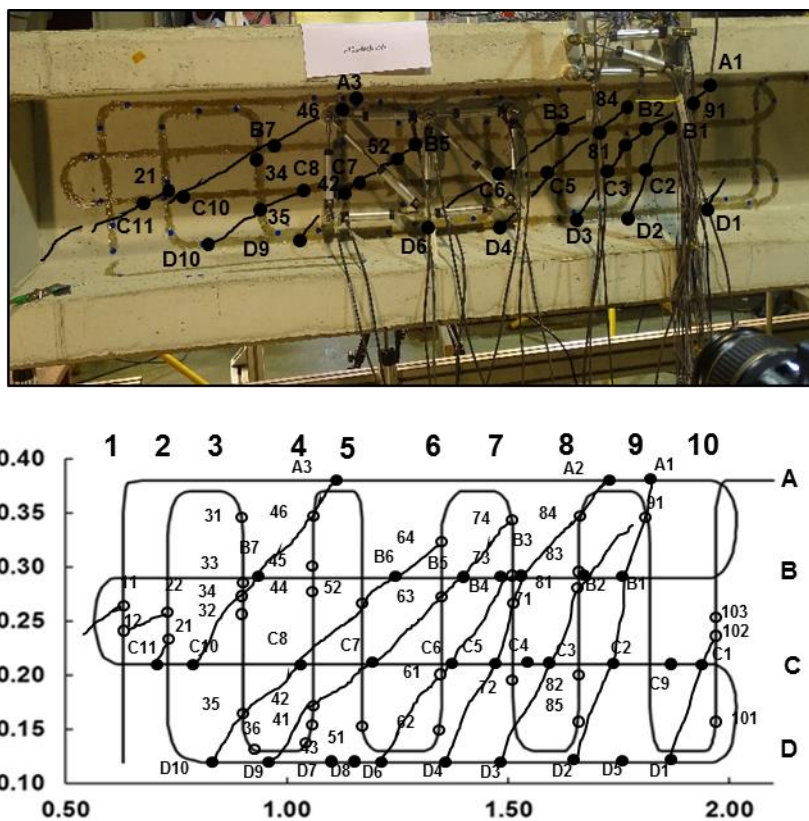


Fig. 6.110 Comparación entre el patrón de fisuración real por cortante y el calculado en el ensayo de la viga I-2 a una carga de 203 kN.

De esta comparación se observa que, de forma general, el patrón de fisuración real puede ser reproducido a través de los puntos de fisuración localizados en la malla 2D conformado por el SFOD1 adherido al alma de la viga.

Cabe señalar que existen algunos puntos de fisuración que de acuerdo al levantamiento fotográfico realizado, no coinciden con el trazo del patrón de fisuración que se obtiene a partir de una inspección visual durante el ensayo. Estos puntos de fisuración pueden ser desde puntos que en niveles de carga superiores serán parte de la conformación de otras fisuras, desperfectos en el pegado de la fibra, presencia de pequeñas oquedades en la superficie de hormigón, y efectos

causados por el alto nivel de deformación al que está sometida la fibra óptica durante este tipo de ensayos.

6.2.5.3 Viga I-3

En las Figs. 6.111 a 6.113 al igual que para los dos ensayos anteriores, se muestran los patrones de fisuración correspondientes a los niveles de carga y sus correspondientes distribuciones de deformación, en la viga I-3.

De las tres vigas ensayadas, esta es la viga que presentó fisuración en la zona instrumentada a un mayor nivel de carga (158 kN). En la Fig. 6.111 se muestran el inicio de la fisuración a partir de este nivel de carga y hasta los 171 kN. A diferencia de las vigas anteriores en las que a un nivel de carga incluso inferior a los 158 kN, el estado de fisuración era más notable, en la viga I-3 a un nivel de carga de 171 kN, el patrón de fisuración no se ha desarrollado todavía con claridad.

Lo anterior se puede comprobar al observar en la Fig. 6.109 el estado de fisuración en el nivel de carga de 148 kN para la viga I-1, y el estado de fisuración de la viga I-2 en el nivel de carga de 142 kN en la Fig. 6.108.

Si se toma en cuenta las características geométricas y las propiedades mecánicas del hormigón de cada una de las vigas ensayadas (Tablas 5.1 y 5.2 del capítulo 5), se puede considerar que el ancho del alma de 18 cm de la viga, y el umbral de deformación de $172 \mu\epsilon$, han sido dos de los principales factores que influyen en la aparición más tardía de la fisuración en la viga I-3 con respecto a las dos vigas anteriores.

En la Fig. 6.112 se muestra el estado de fisuración para niveles de carga entre los 203 y los 224 kN. En esta figura se observa la conformación del estado de fisuración, con una fisura inicial a partir del punto D1, y dos fisuras más, una a partir del punto D2, otra con inicio en el punto D3.

El desarrollo de estas tres fisuras junto con la aparición de nuevos puntos de fisuración, conforman los patrones de fisuración que se muestran en la Fig. 6.113. En esta figura, los niveles de carga mostrados y sus respectivos patrones de fisuración, van de los 238 a los 258 kN.

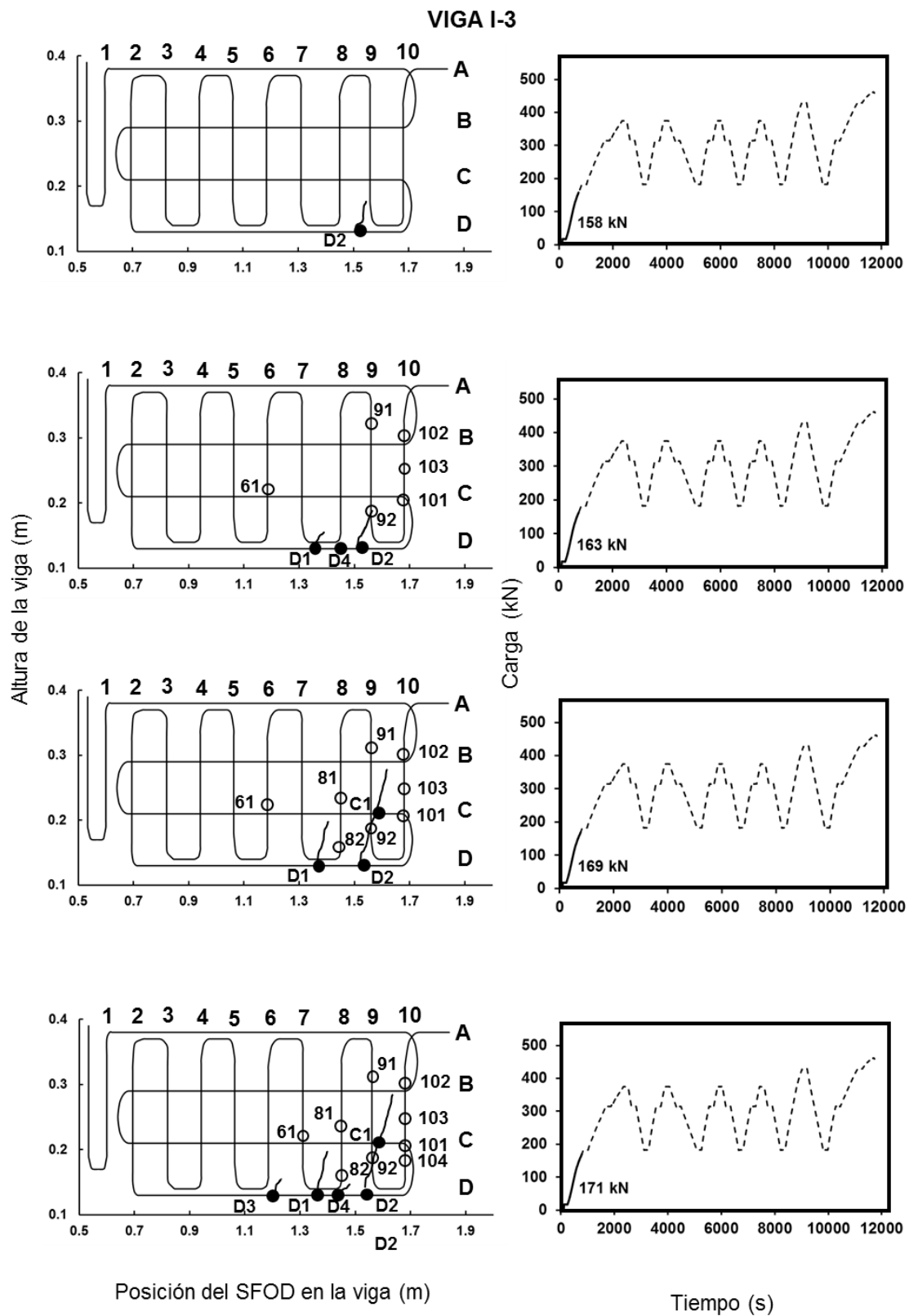


Fig. 6.111 Patrones de fisuración de la viga I-3 (158 a 171 kN)

VIGA I-3

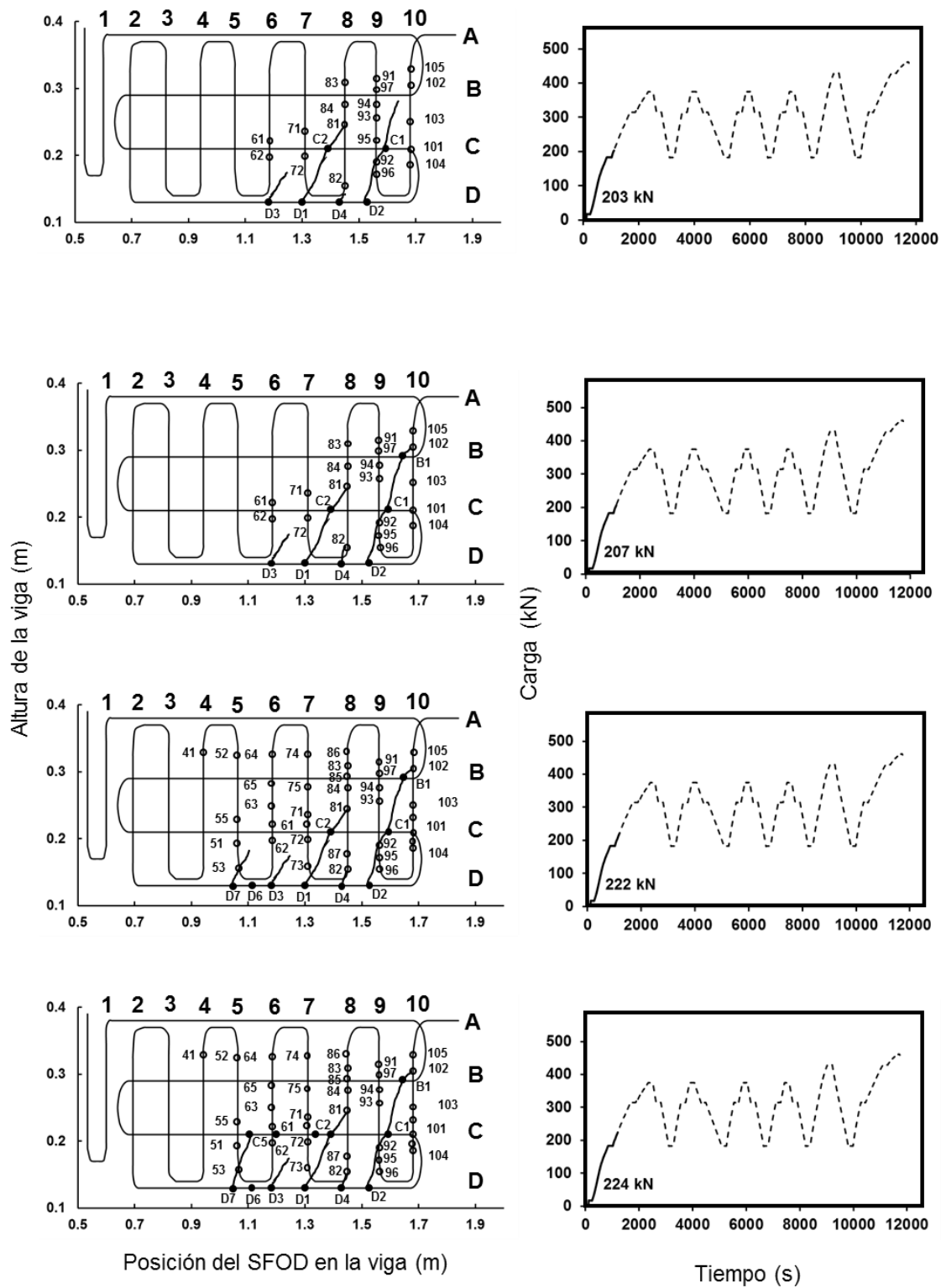


Fig. 6.112 Patrones de fisuración de la viga I-3 (203 a 224 kN)

VIGA I-3

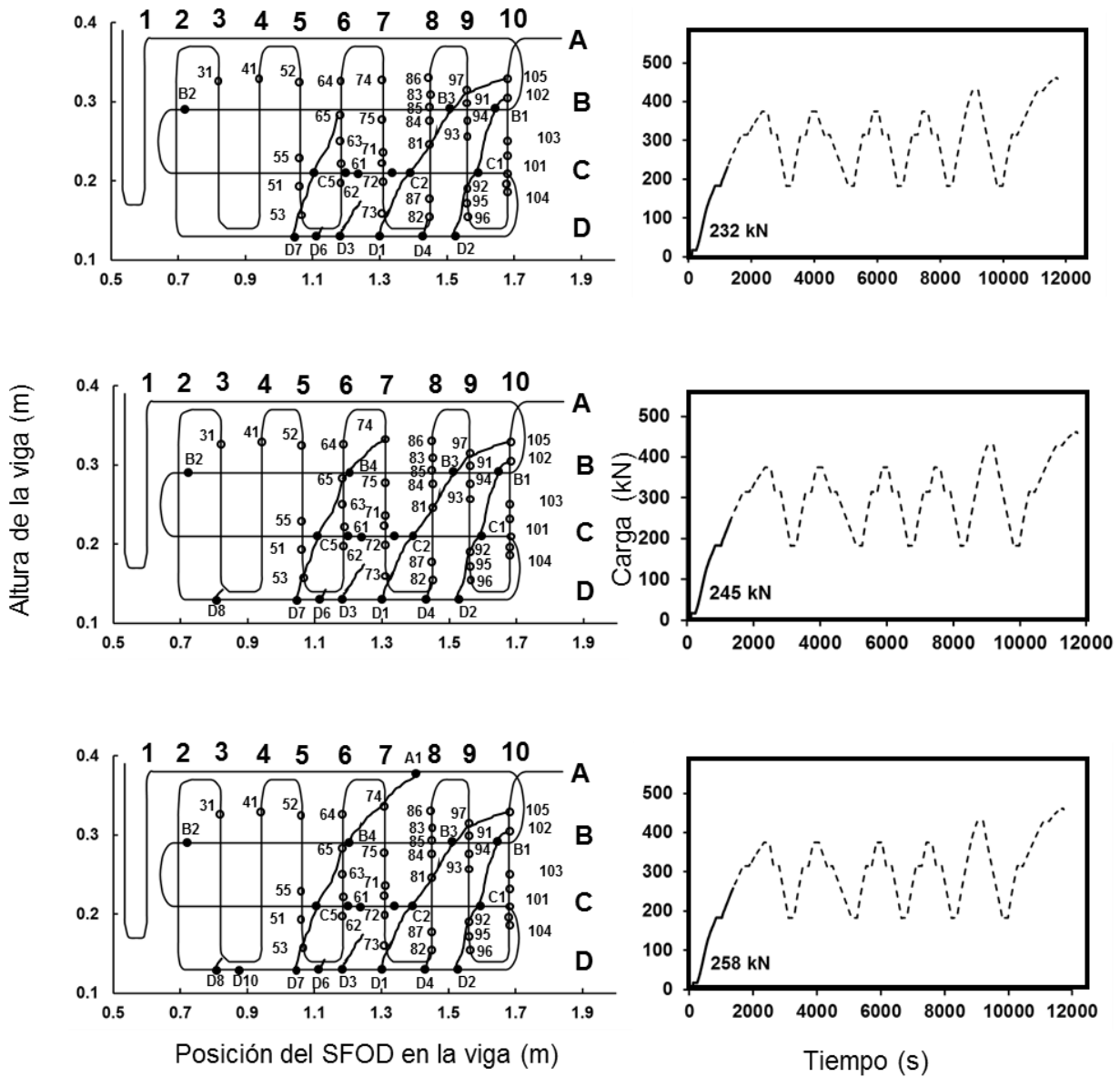
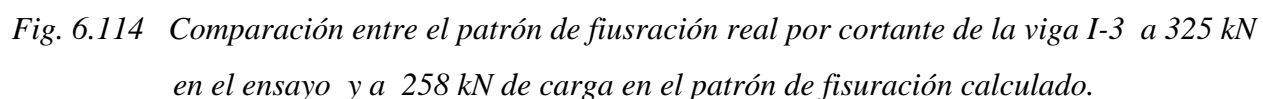


Fig. 6.113 Patrones de fisuración de la viga I-3 (203 a 224 kN)

En la Fig. 6.114 se muestra una comparación entre un patrón de fisuración real en el alma de la viga I-3 y un patrón de fisuración calculado. En esta comparación el patrón de fisuración real corresponde a un nivel de carga de 325 kN, mientras que el patrón de fisuración calculado corresponde a una carga de 258 kN.

Lo comparación anterior tuvo que hacerse de esta forma, ya que no se contó con una fotografía del estado de fisuración de la viga I-3 a un nivel de carga de 258 kN.

Sin embargo, en la Fig. 6.114 se aprecia una muy buena correspondencia entre ambos patrones de fisuración por cortante. La diferencia más significativa está en el desarrollo que presentan las fisuras reales que parten de los puntos D8 y D10, las cuales en el patrón de fisuración calculado, solamente se indican como puntos de fisuración.



En esta sección 6.2.5 se ha establecido la parte del método OBR que tiene como objetivo principal el trazo de los patrones de fisuración por cortante. A partir de una primera localización de puntos de fisuración en las secciones que conforman un SFOD, se puede obtener la forma en la cual se va conformando el patrón de fisuración para cada una de las vigas ensayadas. Cabe mencionar, por lo descrito anteriormente, que el trazo de estos patrones de fisuración resulta problemático después de cierto nivel de carga, a partir del cual, los registros de deformación presentan valores muy poco representativos de la fisuración.

En la Fig. 6.115 se muestra un caso que sirve de ejemplo para mostrar lo que ocurrió con las lecturas de deformación en cada uno de los tres ensayos, para niveles del primer ciclo carga y deformaciones mayores a los casos analizados.

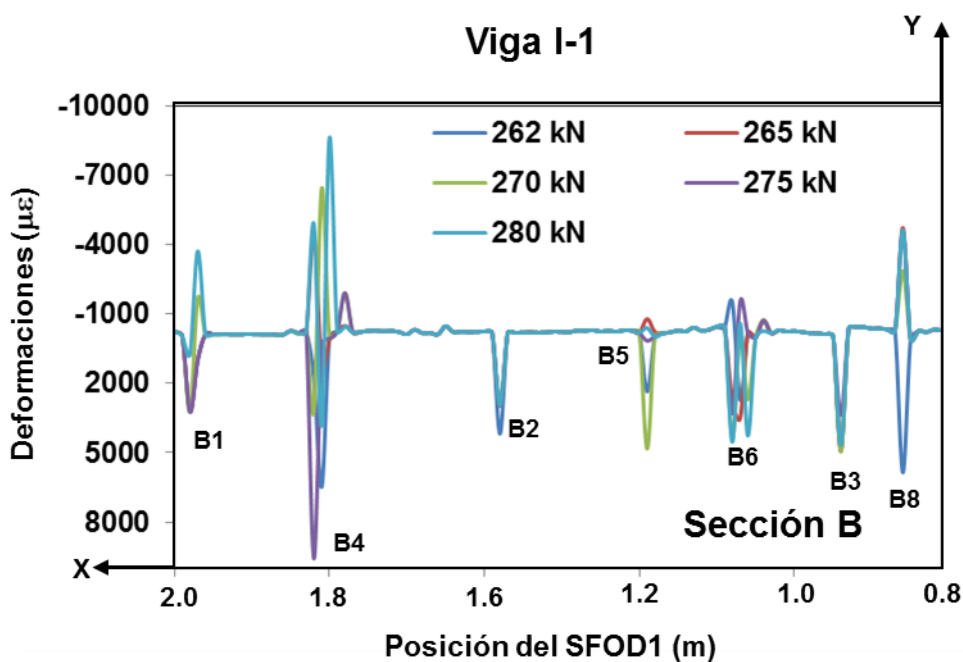


Fig. 6.115 Deformaciones en la sección B del SFOD1 de la viga I-1 a niveles de carga superiores a los 262 kN durante el primer ciclo.

En esta figura se muestra la sección B del SFOD1 adherido a la viga I-1. Esta viga fue analizada anteriormente hasta un nivel de carga de 262 kN, en el cual, en la sección B se habían identificado 8 puntos de fisuración. Al graficar lo que ocurre en la sección B a niveles de carga superiores a los 262 kN, se observa que las deformaciones máximas que se presentan en los picos de deformación

localizados presentan valores de deformación próximos a las 10,000 $\mu\epsilon$, y experimentan cambios de signo. Lo anterior implica que el SFOD pasa de experimentar tracción a compresión, y que tal vez la fisura asociada a ese punto en particular se cierre. Sin embargo, a un nivel de carga y deformación considerable, y con anchos de fisura ya visible, este cierre resulta físicamente poco probable.

Por ello, en este trabajo la detección, localización y el cálculo del ancho de fisuras por cortante en elementos de hormigón, se limita al nivel de deformaciones alrededor y no muy superiores a las 10,000 $\mu\epsilon$ y de cargas entre los 250 y 265 kN que se analizaron en las secciones anteriores, que, en cualquier caso son claramente superiores a los niveles de carga normales en estructuras en servicio.

El estudio de las causas y la posible identificación y cuantificación de los efectos de los esfuerzos cortantes en todos los ciclos de carga que conformaron los ensayos (Figs. 6.1 a 6.3), se deja para estudios posteriores. Lo anterior es posible ya que se cuenta con la información capturada por los SFOD para los tres ensayos hasta la rotura de sensor.

Sin embargo, cabe mencionar que en términos del aspecto visual de los patrones de fisuración, en las tres vigas y para los máximos niveles de carga que se pudo analizar, se observó que los patrones de fisuración de las tres vigas ya se encontraban prácticamente conformados en su totalidad, y que solamente mostraron una variación importante, cuando las vigas estuvieron próximas a la rotura.

6.2.6 El sistema OBR en la cuantificación del daño estructural por cortante

En cuanto a la optimización del uso de sistema OBR en la identificación de daño en elementos de hormigón a cortante, el carácter distribuido y el nivel de resolución espacial de la información se puede utilizar no sólo para la detección y localización, sino también para la cuantificación del daño. En primer lugar, y en forma similar al caso de flexión, pero teniendo en cuenta las características propias del fenómeno de cortante, se estableció un método para el cálculo del ancho de fisura promedio a cortante. Las bases e hipótesis del método propuesto, se han descrito anteriormente en la sección 5.4 del capítulo 5.

6.2.6.1 Deformaciones y anchos de fisura promedio con la instrumentación convencional

Para tener una referencia, en cuanto a la validez de los resultados de las deformaciones obtenidas durante los tres ensayos a través de los SFOD, y del ancho de fisura promedio por el método OBR, se ha recurrido a la comparación de información obtenida con los sensores discretos.

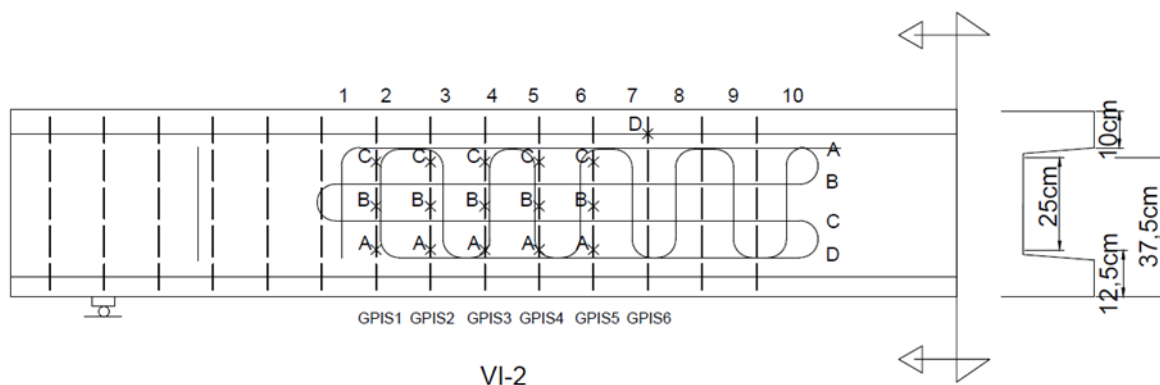
A nivel de deformaciones, se comparan las lecturas promedio de las galgas colocadas en los estribos cercanos a las secciones verticales de los SFOD. La ubicación tanto de las galgas como de las secciones verticales de los SFOD, se muestra en las Figs. 5.22 y 5.23 del capítulo 5.

Esta comparación se realiza únicamente para las vigas I-2 y I-3, ya que en el ensayo de la viga I-1, el SFOD2 colocado en dirección vertical no funcionó correctamente. Con respecto a los anchos de fisura promedio, la comparación se realizó a través de la conformación de rosetas de desplazamiento cuya definición se han descrito en la sección 5.4 del capítulo 5 (Figs. 5.24 a 5.26).

Para las deformaciones, en las Tablas 6.1 a 6.4 se presentan los valores a diferentes niveles de carga de las lecturas de deformación que se obtuvieron en cada una de las galgas instrumentadas.

En las dos últimas columnas de estas tablas se comparan las lecturas de deformación promedio de cada galga y cada sección vertical del SFOD cercana a un estribo instrumentado. Como guía, se muestra en la parte superior de la Tabla 6.48 la ubicación y correspondencia de cada estribo con alguna sección vertical del SFOD1.

Tabla 6.1 Deformaciones obtenidas en cada uno de los estribos instrumentados y en algunas secciones verticales del SFOD1 en la viga I-2 (GPIS1 y Secc2).



Carga (kN)	GPIS1A $\mu\text{m/m}$	GPIS1B $\mu\text{m/m}$	GPIS1C $\mu\text{m/m}$	GPIS1prom $\mu\text{m/m}$	SFOD Secc2 $\mu\text{m/m}$
67	4.0	4.9	9.9	6.3	14.1
77	4.1	5.2	11.5	6.9	15.6
88	4.6	5.7	13.2	7.8	17.5
95	6.5	7.4	14.5	9.5	18.6
100	6.2	7.6	15.7	9.8	19.0
115	17.4	12.9	18.1	16.1	22.6
124	29.8	17.4	19.8	22.3	24.6
142	43.2	27.7	26.2	32.4	30.4
203	537.2	1398.7	1109.1	1015.0	944.5
213	705.4	1559.9	1276.2	1180.5	219.7
224	811.3	1658.6	1384.9	1284.9	1267.8
290	2243.4	3170.5	2140.3	2518.1	3078.3

Tabla 6.2 Deformaciones obtenidas en cada uno de los estribos instrumentados y en algunas secciones verticales del SFOD1 en la viga I-2 (GPIS2 y Secc3).

Carga (kN)	GPIS2A $\mu\text{m/m}$	GPIS2B $\mu\text{m/m}$	GPIS2C $\mu\text{m/m}$	GPIS2prom $\mu\text{m/m}$	SFODSecc3 $\mu\text{m/m}$
67	6.1	3.2	18.3	9.2	10.1
77	5.1	3.0	20.5	9.6	10.9
88	5.5	3.2	23.8	10.8	12.0
95	11.7	4.7	24.9	13.8	12.8
100	13.3	7.6	28.6	16.5	13.1
115	36.2	4.2	27.5	22.7	17.1
124	71.3	-3.7	21.9	29.8	21.0
142	192.3	-1.7	21.7	70.8	30.7
203	1566.1	148.9	323.9	679.6	1386.7
213	1667.6	135.2	439.6	747.5	605.3
224	1780.2	129.3	526.3	811.9	1326.1
290	2633.8	89.8	1402.4	1375.3	3338.1

Tabla 6.3 Deformaciones obtenidas en cada uno de los estribos instrumentados y en algunas secciones verticales del SFOD1 en la viga I-2 (GPIS3 y Secc4).

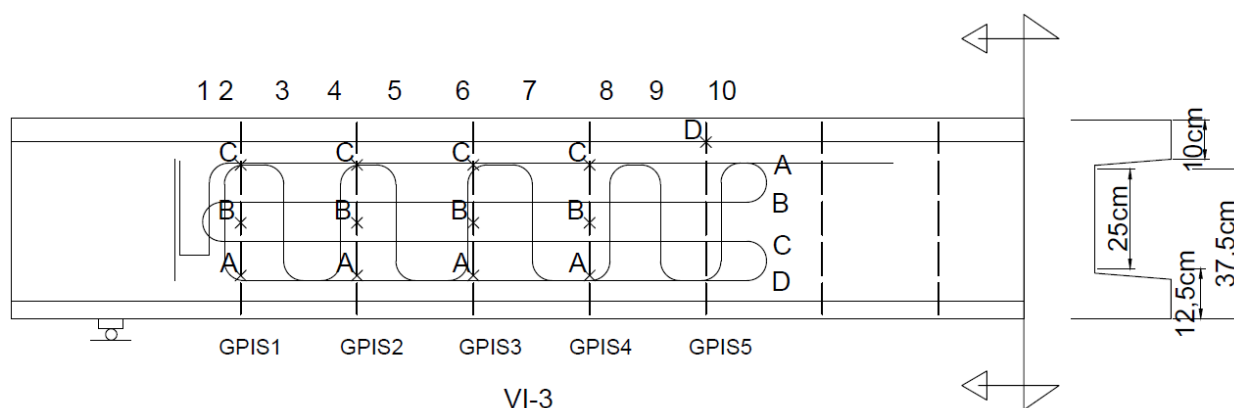
Carga (kN)	GPIS3A $\mu\text{m/m}$	GPIS3B $\mu\text{m/m}$	GPIS3C $\mu\text{m/m}$	GPIS3prom $\mu\text{m/m}$	SFODSecc4 $\mu\text{m/m}$
67	-2.7	5.6	18.8	7.2	-1.6
77	-6.0	4.4	21.0	6.4	-2.6
88	-3.5	6.4	24.7	9.2	-4.1
95	2.9	-0.7	21.6	8.0	-3.8
100	15.9	7.5	24.6	16.0	-3.9
115	13.8	2.3	26.2	14.1	0.7
124	111.4	108.2	31.0	83.5	4.2
142	242.0	424.4	37.9	234.8	13.8
203	1292.7	1951.0	1410.8	1551.5	1910.3
213	1438.5	2059.1	1615.1	1704.3	2236.2
224	1609.0	2162.7	1794.7	1855.5	1400.7
290	3072.0	3329.9	3056.5	3152.8	3891.3

Tabla 6.4 Deformaciones obtenidas en cada uno de los estribos instrumentados y en algunas secciones verticales del SFOD1 en la viga I-2 (GPIS6 y Secc7).

Carga (kN)	GPIS6D $\mu\text{m/m}$	SFODsecc7 $\mu\text{m/m}$
67	15.2	6.3
77	15.7	5.9
88	19.2	6.2
95	21.3	-3.3
100	30.4	-5.9
115	51.3	15.3
124	47.6	210.0
142	79.6	159.1
203	457.7	2259.8
213	535.3	642.7
224	622.4	3503.7
290	1168.5	2139.1

En las tablas anteriores, la correspondencia entre las lecturas promedio de las galgas y las secciones verticales del SFOD, resulta de un nivel muy aceptable, sobre todo de aquellas lecturas entre 67 y 142 kN, en los cuales el nivel de fisuración todavía no es muy considerable. Para su interpretación hay que tener en cuenta que las galgas están embebidas en los estribos, y por lo tanto sujetas a niveles de esfuerzo diferentes a los que se generan en una superficie no homogénea como es el hormigón.

Tabla 6.5 Deformaciones obtenidas en cada uno de los estribos instrumentados y en algunas secciones verticales del SFOD1 en la viga I-3 (GPIS1 y Secc2)



Carga (kN)	GPIS1A $\mu\text{m/m}$	GPIS1B $\mu\text{m/m}$	GPIS1C $\mu\text{m/m}$	GPIS1prom $\mu\text{m/m}$	SFOD Secc2 $\mu\text{m/m}$
159	-14.8	1.3	8.5	-1.7	15.9
163	-15.4	1.5	8.9	-1.7	-234.3
169	-16.2	1.5	9.3	-1.8	-237.2
172	-16.3	1.6	9.5	-1.7	-240.4
203	-17.2	5.1	13.1	0.3	-329.8
205	-17.1	5.3	13.3	0.5	-334.7
207	-17.1	5.7	13.7	0.7	-334.7
223	-4.2	-10.3	4.1	-3.5	-584.1
224	-3.7	-9.6	3.6	-3.2	-584.0
232	-0.6	-7.8	3.4	-1.7	-579.9
246	8.6	0.2	6.8	5.2	-579.2
259	34.0	19.7	20.0	24.6	-581.2

Tabla 6.6 Deformaciones obtenidas en cada uno de los estribos instrumentados y en algunas secciones verticales del SFOD1 en la viga I-3 (GPIS2 y Secc4)

Carga (kN)	GPIS2A $\mu\text{m/m}$	GPIS2B $\mu\text{m/m}$	GPIS2C $\mu\text{m/m}$	GPIS2prom $\mu\text{m/m}$	SFOD Secc4 $\mu\text{m/m}$
159	-26.4	0.6	10.8	-5.0	-233.9
163	-27.0	0.6	11.2	-5.0	-235.3
169	-27.8	1.3	12.0	-4.8	-241.3
172	-28.0	1.3	12.1	-4.9	-241.9
203	-27.2	0.4	13.2	-4.6	-330.9
205	-26.7	0.6	13.2	-4.3	-332.1
207	-26.5	1.0	13.6	-4.0	-332.5
223	77.9	28.2	28.3	44.8	-505.6
224	82.9	33.0	30.7	48.9	-584.8
232	87.8	68.7	38.5	65.0	-211.9
246	59.1	357.9	25.1	147.4	-350.8
259	56.6	1472.5	42.5	523.8	-457.0

Tabla 6.7 Deformaciones obtenidas en cada uno de los estribos instrumentados y en algunas secciones verticales del SFOD1 en la viga I-3 (GPIS2 y Secc4)

Carga (kN)	GPIS2A $\mu\text{m/m}$	GPIS2B $\mu\text{m/m}$	GPIS2C $\mu\text{m/m}$	GPIS2prom $\mu\text{m/m}$	SFOD Secc4 $\mu\text{m/m}$
159	-26.4	0.6	10.8	-5.0	-233.9
163	-27.0	0.6	11.2	-5.0	-235.3
169	-27.8	1.3	12.0	-4.8	-241.3
172	-28.0	1.3	12.1	-4.9	-241.9
203	-27.2	0.4	13.2	-4.6	-330.9
205	-26.7	0.6	13.2	-4.3	-332.1
207	-26.5	1.0	13.6	-4.0	-332.5
223	77.9	28.2	28.3	44.8	-505.6
224	82.9	33.0	30.7	48.9	-584.8
232	87.8	68.7	38.5	65.0	-211.9
246	59.1	357.9	25.1	147.4	-350.8
259	56.6	1472.5	42.5	523.8	-457.0

Tabla 6.8 Deformaciones obtenidas en cada uno de los estribos instrumentados y en algunas secciones verticales del SFOD1 en la viga I-3 (GPIS3 y Secc6)

Carga (kN)	GPIS3A $\mu\text{m/m}$	GPIS3B $\mu\text{m/m}$	GPIS3C $\mu\text{m/m}$	GPIS3prom $\mu\text{m/m}$	SFOD Secc6 $\mu\text{m/m}$
159	23.2	0.4	15.6	13.0	-138.8
163	35.3	-2.8	11.7	14.7	-202.8
169	45.6	-0.2	12.8	19.4	-207.3
172	54.5	1.0	13.1	22.9	395.0
203	237.1	-20.2	15.0	77.3	-233.8
205	251.0	-19.5	14.3	81.9	-245.3
207	270.3	-19.1	13.8	88.3	-246.7
223	351.3	3.5	-0.3	118.2	467.7
224	359.4	9.5	-1.5	122.4	307.8
232	395.8	61.3	-4.6	150.9	78.5
246	458.5	168.1	-9.2	205.8	421.1
259	625.4	470.7	261.4	452.5	659.9

Tabla 6.9 Deformaciones obtenidas en cada uno de los estribos instrumentados y en algunas secciones verticales del SFOD1 en la viga I-3 (GPIS4 y Secc8)

Carga (kN)	GPIS4A $\mu\text{m/m}$	GPIS4B $\mu\text{m/m}$	GPIS4C $\mu\text{m/m}$	GPIS4prom $\mu\text{m/m}$	SFOD Secc8 $\mu\text{m/m}$
159	-38.6	-15.9	34.2	-6.8	-242.7
163	24.6	-9.4	33.5	16.2	-237.9
169	33.0	-12.2	33.0	18.0	-178.9
172	36.2	-11.5	33.3	19.3	-177.2
203	17.6	19.6	44.6	27.3	873.7
205	16.8	20.8	45.3	27.6	279.6
207	15.4	21.9	46.6	28.0	-95.6
223	15.7	35.1	56.8	35.9	881.2
224	16.1	33.7	58.7	36.2	1119.2
232	16.9	28.0	68.9	37.9	2101.6
246	28.6	29.2	71.6	43.1	2729.1
259	32.5	81.1	260.8	124.8	4335.0

Tabla 6.10 Deformaciones obtenidas en cada uno de los estribos instrumentados y en algunas secciones verticales del SFOD1 en la viga I-3 (GPIS5 y Secc10)

Carga (kN)	GPIS5 $\mu\text{m/m}$	SFOD Secc10 $\mu\text{m/m}$
159	25.9	-423.6
163	26.8	-174.7
169	28.1	-126.3
172	28.3	-77.0
203	36.3	1263.2
205	36.5	775.1
207	37.2	657.3
223	38.8	2201.5
224	38.9	1245.8
232	39.4	1452.8
246	38.8	4158.4
259	32.4	5569.2

En las Tablas 6.5 a 6.10 se lleva a cabo la comparación de las lecturas promedio de las galgas y las secciones verticales del SFOD de la viga I-3. En este caso la comparación de los promedios de deformación entre ambos sistemas no muestra similitud en los valores obtenidos. Desde un inicio los valores muestran diferencias importantes. Los valores promedio de las galgas mantienen en general valores de tracción y bajos en deformación con respecto al nivel de cargas. Por otro lado las secciones verticales del SFOD, presentan valores de compresión y con incrementos importantes en las secciones 2 y 4, las cuales son las secciones más alejadas de la zona fisurada.

Conforme se comparan valores de deformación promedio en las galgas y los de las secciones del SFOD más cercanos al punto de aplicación de la carga, se aprecia un cambio de valores de compresión a tracción. Este cambio de signo se presenta en ambos sistemas de medición a partir de las cargas superiores a los 200kN. Lo anterior puede indicar que aunque las galgas y el SFOD miden cuantitativamente valores diferentes, a nivel cualitativo si muestran similitud.

En este caso, la información experimental que se obtuvo con ambos sistemas de medición, no es suficiente para encontrar la explicación de la diferencia en estas mediciones. Una posible alternativa sería contar con un modelo numérico que ayudara a confirmar o aclarar la información experimental.

Con relación a los anchos de fisura promedio obtenidos por medio de las rosetas de deformación, en las Tablas 6.11 a 6.13 se resumen los desplazamientos obtenidos de acuerdo a la identificación de los potenciómetros que las conforman, y que fueron descritos en la sección 5.5.5.1 del capítulo 5. Posteriormente estas lecturas se compararán con los anchos de fisura calculados con el método OBR.

Tabla 6.11 Lectura de desplazamientos de los potenciómetros de la roseta de la viga I-1

Carga (kN)	V1_pot (mm)	V2_pot (mm)	V3_pot (mm)	H1_pont (mm)	H2_pot (mm)	H3_pot (mm)	H4_pot (mm)	D1_pot (mm)	D2_pot (mm)
47	0.000	-0.001	-0.001	-0.004	0.002	-0.001	0.003	0.009	0.002
60	-0.001	-0.001	-0.001	-0.005	0.003	-0.002	0.003	0.011	0.002
62	-0.001	-0.002	-0.001	-0.005	0.003	-0.002	0.003	0.011	0.003
71	-0.001	-0.002	-0.002	-0.005	0.003	-0.002	0.004	0.012	0.003
80	-0.002	-0.002	-0.002	-0.005	0.003	-0.002	0.004	0.013	0.003
94	-0.004	-0.001	0.005	-0.005	0.006	-0.003	0.004	0.017	0.004
102	-0.004	0.001	0.005	-0.005	0.006	-0.003	0.002	0.018	0.003
106	0.001	-0.002	0.018	-0.004	0.000	-0.003	0.031	0.014	0.007
122	0.003	0.000	0.036	-0.006	-0.001	-0.003	0.047	0.017	0.020
148	0.013	0.037	0.065	-0.004	0.022	-0.007	0.051	0.069	0.031
199	0.162	0.209	0.099	0.022	0.075	0.010	0.037	0.375	0.159
216	0.391	0.390	0.112	0.004	0.073	0.065	0.029	0.626	0.312
224	0.425	0.421	0.114	0.001	0.075	0.075	0.031	0.667	0.351
262	0.730	0.713	0.120	-0.004	0.072	0.136	0.003	0.994	0.577

Tabla 6.12 Lectura de desplazamientos de los potenciómetros de la roseta de la viga I-2

Carga (kN)	V1_pont (mm)	V2_pont (mm)	V3_pont (mm)	H1_pont (mm)	H2_pont (mm)	H3_pont (mm)	H4_pont (mm)	D1_pont (mm)	D2_pont (mm)
67	-0.003	-0.002	0.000	-0.005	0.006	-0.009	0.003	0.015	0.001
76	-0.003	-0.002	-0.001	-0.006	0.007	-0.010	0.005	0.017	0.001
87	-0.003	-0.003	-0.001	-0.007	0.008	-0.009	0.006	0.020	0.001
95	-0.003	-0.001	-0.002	-0.006	0.007	-0.008	0.005	0.021	0.000
98	-0.003	-0.001	0.001	-0.008	0.007	-0.009	0.003	0.022	0.000
100	-0.003	-0.001	0.003	-0.008	0.008	-0.009	0.003	0.023	0.000
115	-0.002	0.001	-0.005	-0.009	0.001	-0.007	0.002	0.021	-0.002
123	0.002	-0.002	0.001	-0.009	-0.001	-0.009	0.009	0.019	0.000
203	0.113	0.103	0.262	0.000	0.003	-0.005	0.050	0.192	0.291
213	0.131	0.114	0.280	0.004	0.014	-0.005	0.056	0.215	0.330
224	0.148	0.124	0.295	0.009	0.017	-0.003	0.062	0.234	0.354
260	0.260	0.160	0.289	0.020	0.002	0.004	0.006	0.337	0.345

Tabla 6.13 Lectura de desplazamientos de los potenciómetros de la roseta de la viga I-3

Carga (kN)	V1_pot (mm)	V2_pot (mm)	V3_pot (mm)	H1_pot (mm)	H2_pot (mm)	H3_pot (mm)	H4_pot (mm)	D1_pot (mm)	D2_pot (mm)
159	0.001	-0.003	0.001	-0.010	0.012	-0.012	0.011	0.013	0.016
163	0.001	-0.002	0.002	-0.009	0.012	-0.012	0.011	0.012	0.017
169	0.001	-0.002	-0.001	-0.010	0.012	-0.012	0.012	0.013	0.017
172	0.001	-0.002	-0.001	-0.009	0.012	-0.012	0.012	0.013	0.017
203	0.003	-0.003	0.004	-0.011	0.012	-0.013	0.013	0.017	0.020
205	0.004	-0.003	0.004	-0.011	0.012	-0.013	0.014	0.017	0.021
207	0.004	-0.003	0.004	-0.012	0.012	-0.013	0.016	0.017	0.021
223	-0.003	0.004	-0.015	-0.012	0.044	-0.010	-0.004	0.029	0.000
224	-0.003	0.006	-0.017	-0.012	0.049	-0.010	-0.007	0.030	-0.005
232	-0.003	0.010	-0.022	-0.012	0.053	-0.010	-0.016	0.033	-0.021
246	0.002	0.015	-0.019	-0.012	0.061	-0.011	-0.036	0.040	-0.033
259	0.006	0.024	-0.002	-0.014	0.071	-0.002	-0.053	0.092	0.014

6.2.6.2 Anchos de fisura promedio con la aplicación del método OBR

La posibilidad de la obtención del patrón de fisuración permite también el cálculo del ángulo de inclinación de las fisuras. Dicho ángulo, puede ser obtenido de manera detallada con respecto al eje horizontal de la viga y con las coordenadas de cada punto que conforman una fisura, o bien, se puede calcular su promedio para cada fisura detectada. En las Figs. 6.116 a 6.118 se numeran cada una de las fisuras identificadas para cada ensayo. En las Tablas 6.14 a 6.16 se resumen los ángulos y los promedios obtenidos para los tres ensayos.

La Fig. 6.116 a 6.118 muestran las principales fisuras en la viga ensayadas. Se indica dentro de un círculo el número de fisura identificada, el cual corresponde al orden con el que las fisuras aparecieron a lo largo de cada ensayo.

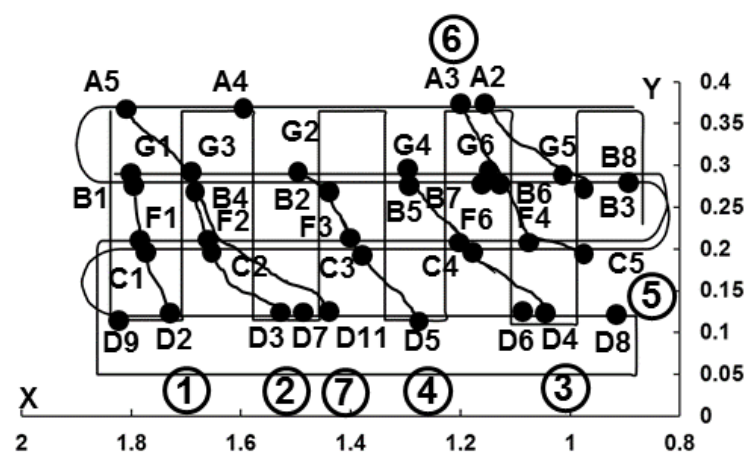


Fig. 6.116 Identificación de fisuras que conforman el patrón de fisuración de la viga I-1

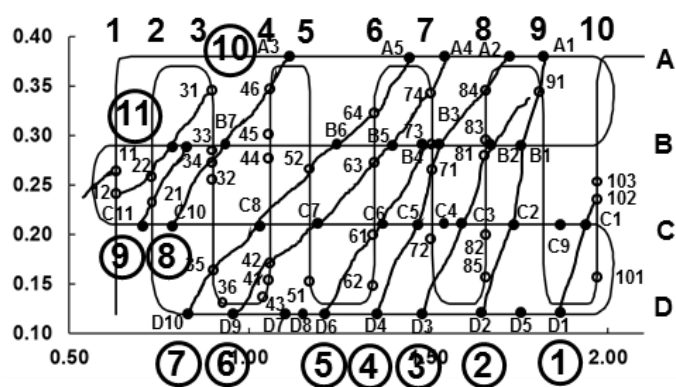


Fig. 6.117 Identificación de fisuras que conforman el patrón de fisuración de la viga I-2

Tabla 6.14 Ángulos de inclinación de las fisuras obtenidos para la viga I-1

Fisura	Punto	X	Y	Ángulo
1	D2	1.7	0.12	45.0
	C1	1.78	0.2	45.0
	F1	1.79	0.21	66.8
	B1	1.82	0.28	45.0
	G1	1.83	0.29	Prom = 50.5
2	D3	1.51	0.12	38.7
	C2	1.61	0.2	45.0
	F2	1.62	0.21	66.8
	B4	1.65	0.28	26.6
	G3	1.67	0.29	Prom = 43.3
3	D4	1.05	0.12	36.0
	C4	1.16	0.2	4.1
	F6	1.3	0.21	21.3
	B7	1.12	0.28	4.1
	G4	1.26	0.29	Prom = 16.4
4	D5	1.24	0.12	33.7
	C3	1.36	0.2	45.0
	F3	1.37	0.21	49.4
	B2	1.43	0.28	26.6
	G2	1.45	0.29	25.0
	A4	1.3	0.36	Prom = 35.9
5	C5	0.89	0.2	2.0
	F4	1.17	0.21	41.2
	B6	1.09	0.28	9.5
	G6	1.15	0.29	47.1
	A3	1.215	0.36	Prom = 25
6	B3	0.99	0.28	26.6
	G5	1.01	0.29	20.7
	A2	1.195	0.36	Prom = 26.3
7	D11	1.46	0.12	40.1
	B4	1.65	0.28	26.6
	G3	1.67	0.29	25.0
	A5	1.82	0.36	Prom = 30.6

Tabla 6.15 Ángulos de inclinación de las fisuras obtenidos para la viga I-2

Fisura	Punto	X	Y	Ángulo
1	D1	1.99	0.13	82.6
	C1	2.00	0.20	45.7
	103	1.97	0.23	Prom = 60.1
2	D2	1.70	0.12	56.3
	C2	1.76	0.21	76.0
	B1	1.78	0.29	63.4
	91	1.81	0.35	20.6
	A1	1.89	0.38	Prom = 54.1
3	D3	1.56	0.12	32.7
	C3	1.70	0.21	51.3
	81	1.66	0.26	26.6
	B2	1.72	0.29	Prom = 36.9
4	D4	1.40	0.12	42.0
	C5	1.50	0.21	71.6
	71	1.51	0.24	26.6
	B3	1.61	0.29	60.9
	84	1.66	0.20	60.9
	A2	1.76	0.38	Prom = 52.4
5	D6	1.27	0.12	45.0
	61	1.35	0.20	14.0
	C6	1.39	0.21	33.7
	B4	1.51	0.29	Prom = 30.9
6	D9	0.98	0.12	51.3
	42	1.06	0.22	3.6
	C7	1.22	0.21	8.7
	63	1.35	0.19	73.3
	B5	1.38	0.29	28.3
	74	1.51	0.22	69.4
	A4	1.57	0.38	Prom = 41
7	D10	0.80	0.12	56.2
	35	0.90	0.27	19.4
	C8	1.07	0.21	21.8
	52	1.17	0.17	50.2
	B6	1.27	0.29	36.9
	64	1.35	0.23	59.0
	A5	1.44	0.38	Prom = 48.7
8	C10	0.76	0.21	32.7
	34	0.90	0.30	18.4
	B7	0.93	0.29	13.0
	46	1.06	0.32	33.7
	A3	1.15	0.38	Prom = 24.5
9	C11	0.71	0.21	56.3
	21	0.73	0.18	50.7
	B10	0.82	0.29	Prom = 43.8
10	12	0.63	0.17	11.3
	22	0.73	0.19	78.7
	B11	0.75	0.29	14.9
	31	0.90	0.33	Prom = 35
11	11	0.63	0.24	Prom = 45

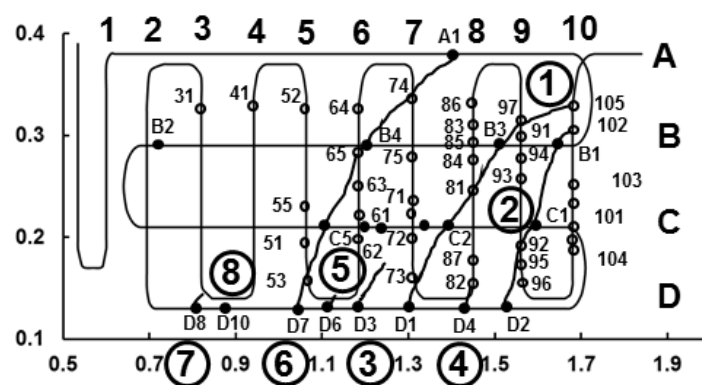


Fig. 6.118 Identificación de fisuras que conforman el patrón de fisuración de la viga I-3

Tabla 6.16 Ángulos de inclinación de las fisuras obtenidos para la viga I-3

Fisura	Punto	X	Y	Ángulo
1	D1	1.32	0.13	80.5
	73	1.31	0.19	8.7
	C2	1.44	0.21	44.6
	81	1.45	0.24	26.7
	B3	1.54	0.29	35.7
	97	1.56	0.21	31.2
	105	1.68	0.20	Prom = 33.4
2	D2	1.57	0.13	81.9
	92	1.56	0.20	26.6
	C1	1.58	0.21	58.0
	B1	1.63	0.29	11.3
	102	1.68	0.30	Prom = 44.4
3	D3	1.21	0.13	45.0
4	D4	1.42	0.13	80.0
	82	1.45	0.30	
5	D6	1.16	0.13	45.0
6	D7	1.03	0.13	16.3
	53	1.08	0.14	74.7
	C5	1.06	0.21	35.8
	65	1.19	0.30	15.9
	B4	1.15	0.29	39.9
	74	1.32	0.15	70.3
	A1	1.40	0.38	Prom =25.8
7	D8	0.78	0.13	45.0
8	D10	0.86	0.13	45.0

Respecto a la cuantificación del daño, se ha aplicado el método OBR propuesto en el capítulo 5 y se han calculado anchos de fisura promedio. Como ya se ha mencionado, este cálculo solamente se pudo realizar en forma limitada, sin considerar la información obtenida con el sistema OBR en todos los ciclos de carga y descarga de los tres ensayos

Al analizar la información experimental obtenida, se observó que en aquellos puntos en los cuales se presentó la detección de fisuración y conforme el nivel de deformación y carga aumentó, los SFOD pueden presentar lecturas poco confiables de deformación. Así en cada ensayo, el cálculo de ancho de fisura promedio, se acotó al nivel de carga en el cual el SFOD presentó un comportamiento aceptable y con resultados más fiables, que se confirmaron con los anchos de fisura obtenidos a través de las rosetas de deformación.

Por ello, para el cálculo del ancho de fisura promedio en cada una de las vigas ensayadas, se aprovechan los registros continuos de deformación obtenidos en las secciones horizontales y verticales que conformaron cada uno de los SFOD, y que se muestran en la sección 6.2.4.

A partir de estos registros, se aplica el método OBR descrito en la sección 5.4 del capítulo 5, cuyo primer paso ha consistido en el cálculo del área bajo la curva de cada gráfica a partir del umbral de deformación por tracción (ϵ_{fct}) de cada viga, y la distinción entre las longitudes fisuradas (L_{fis}) y la longitudes efectivas (L_e) que establece el método OBR.

Al contar con los parámetros anteriores, se procede a aplicar las ecuaciones 5.1 a 5.5 conforme el caso analizado lo requiera. Se consideran los distintos umbrales de deformación, la variación de los ángulos de fisuración, el número de fisuras existente en cada sección y las componentes horizontales y verticales de deformación en cada viga ensayada.

6.2.6.2.1 Viga I-1

En el caso del cálculo de los anchos de fisura promedio debidos a cortante de la viga I-1, no se contó con la información experimental completa de los SFODI.

Debido al falló que se presentó en el SFOD2, la información del componente vertical de la deformación por cortante no se pudo tener en cuenta en el cálculo del respectivo ancho de fisura. Sin embargo, se procedió a realizar dicho cálculo con el método OBR pero considerando esta limitación. Posteriormente se comparan los resultados, con los obtenidos por medio de la roseta de desplazamiento colocada en el alma de la viga.

En las Tablas 6.17 y 6.18 se presentan los anchos de fisura promedio (w_{OBR}) para cada uno de los niveles de carga estudiados.

Tabla 6.17 Ancho de fisura promedio (w_{OBR}) calculado para la viga I-1 (60 a 122 kN)

Q (kN)	60	62	71	80	94	102	106	122
Sección	w_{OBR}							
A								
G						0.0000	0.0011	0.0524
B						0.0001	0.0026	0.0107
Promedio						0.0000	0.0019	0.0315
F					0.0008	0.0484	0.0201	0.0030
C				0.0003		0.0058	0.0007	0.0011
D	0.0001	0.0002	0.0002		0.0080	0.0033	0.0490	0.0439
Promedio	0.0001	0.0002	0.0002	0.0003	0.0044	0.0192	0.0233	0.0160

Tabla 6.18 Ancho de fisura promedio (w_{OBR}) calculado para la viga I-1 (148 a 262 kN)

Q (kN)	148	187	192	199	209	216	224	262
Sección	w_{OBR}							
A		0.0003	0.0000	0.0004	0.0010	0.0028	0.0027	0.0090
G	0.0144	0.0430	0.0538	0.0681	0.0706	0.0709	0.0918	0.0854
B	0.0071	0.0365	0.0226	0.0453	0.0334	0.0298	0.0300	0.0441
Promedio	0.0108	0.0266	0.0255	0.0379	0.0350	0.0345	0.0415	0.0462
F	0.0126	0.0378	0.0681	0.0944	0.0165	0.0386	0.0602	0.0162
C	0.0450	0.0507	0.0860	0.0497	0.0439	0.0286	0.0362	0.0430
D	0.0268	0.0569	0.0129	0.0345	0.0203	0.0406	0.0065	0.0441
Promedio	0.0281	0.0485	0.0557	0.0595	0.0269	0.0359	0.0343	0.0344

En estas tablas se puede observar la forma en que se fueron presentando los diferentes anchos de fisura y su variación por sección y para cada nivel de carga.

Para hacer comparable los anchos de fisura (w_{OBR}) con la información de la roseta de deformación, se utilizaron únicamente los potenciómetros horizontales designados como H3 Y H1 en la parte superior de la roseta, y los potenciómetros H4 y H2 colocados en la parte inferior. Lo anterior se indica en la Fig. 6.119

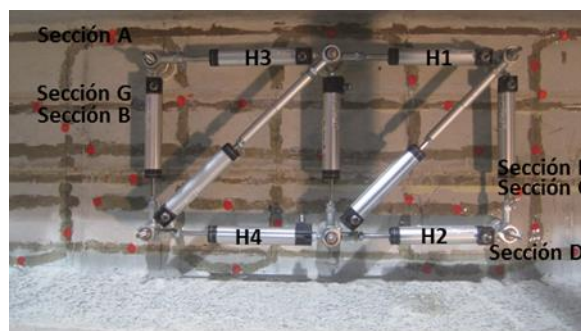


Fig. 6.119 Potenciómetros horizontales de la viga I-3

Se obtuvo un promedio de las lecturas de los potenciómetros H3 y H1, y de los potenciómetros H4 y H2, para los niveles de carga estudiados. Lo anterior se muestra en la Tabla 6.19.

Tabla 6.19 Ancho de fisura promedio (w_{Pot}) calculado para la viga I-2 (148 a 262 kN)

Carga (kN)	H3 (mm)	H1 (mm)	H4 (mm)	H2 (mm)	w_{Poten} Hsuperior	w_{Poten} Hinferior
47	-0.001	-0.004	0.003	0.002	-0.003	0.002
60	-0.002	-0.005	0.003	0.003	-0.003	0.003
62	-0.002	-0.005	0.003	0.003	-0.003	0.003
71	-0.002	-0.005	0.004	0.003	-0.004	0.003
80	-0.002	-0.005	0.004	0.003	-0.003	0.004
94	-0.003	-0.005	0.004	0.006	-0.004	0.005
102	-0.003	-0.005	0.002	0.006	-0.004	0.004
106	-0.003	-0.004	0.031	0.000	-0.003	0.015
122	-0.003	-0.006	0.047	-0.001	-0.005	0.023
148	-0.007	-0.004	0.051	0.022	-0.006	0.037
187	0.006	0.015	0.039	0.066	0.010	0.052
192	0.007	0.016	0.037	0.070	0.012	0.054
199	0.010	0.022	0.037	0.075	0.016	0.056
209	0.013	0.032	0.033	0.081	0.023	0.057
216	0.065	0.004	0.029	0.073	0.035	0.051
224	0.075	0.001	0.031	0.075	0.038	0.053
262	0.136	-0.004	0.003	0.072	0.066	0.037

Para comparar los anchos de fisura w_{OBR} con los promedios que se muestran en las dos últimas columnas (w_{Poten} Hsuperior y w_{Poten} Hinferior) de la Tabla 6.65, las secciones de fibra óptica se dividieron en dos grupos. Primero se consideraron las lecturas de las secciones A, G y B y el promedio obtenido se comparó con los valores de la columna w_{Poten} Hsuperior de la Tabla 6.19. Después se promediaron los anchos de fisura de las secciones F, C y D y se compararon con los

valores de la columna w_{Poten} Hinferior de la Tabla 6.65. Lo anterior, en función de la cercanía de cada grupo de secciones del SFOD con los potenciómetros horizontales. Lo anterior también se observa en la Fig. 6.119. Los promedios de los dos grupos de secciones del SFOD se muestran en la Tablas 6.17 y 6.18.

En la Tabla 6.20 se resume los anchos de fisura por cortante que se obtienen de los dos tipos de instrumentación. En forma general y aunque existen diferencias en algunos valores, los anchos de fisura resultan con un buen nivel de correspondencia, sobre todo en los niveles de carga más elevados. Lo anterior es un buen indicativo del potencial del método OBR para el cálculo de ancho de fisura por cortante.

En el caso de los anchos de fisura obtenidos para esta viga, hay que tener en cuenta que no se pudo considerar la influencia de la componente vertical de la deformación.

Tabla 6.20 Comparación de anchos de fisura promedio w_{Pot} y w_{OBR} para la viga I-1

Carga (kN)	w_{Poten} Hsuperior	w_{OBR} (mm)	w_{Poten} Hinferior	w_{OBR} (mm)
60	-0.003		0.003	0.000
62	-0.003		0.003	0.000
71	-0.004		0.003	0.000
80	-0.003		0.004	0.000
94	-0.004		0.005	0.004
102	-0.004	0.000	0.004	0.019
106	-0.003	0.002	0.015	0.023
122	-0.005	0.032	0.023	0.016
148	-0.006	0.011	0.037	0.028
187	0.010	0.027	0.052	0.048
192	0.012	0.025	0.054	0.056
199	0.016	0.038	0.056	0.060
209	0.023	0.035	0.057	0.027
216	0.035	0.035	0.051	0.036
224	0.038	0.041	0.053	0.034
262	0.066	0.046	0.037	0.034

6.2.6.2.2 Viga I-2

En el caso del cálculo del ancho de fisura por cortante para la viga I-2, se tuvo la posibilidad de contar con la información simultánea de las deformaciones en dos direcciones perpendiculares. En este sentido, se obtuvieron las áreas bajo la curva tanto de la distribución de las deformaciones en las secciones horizontales A, B, C y D, como de las secciones verticales denominadas 1 a 10.

A partir de la aplicación del método OBR, se obtuvieron los anchos de fisura promedio para cada uno de los casos de carga estudiados para la viga I-2. En las Tablas 6.21 y 6.22 se muestran estos anchos de fisura.

Tabla 6.21 Ancho de fisura promedio (w_{OBR}) calculado para la viga I-2 (67 a 115 kN)

Q (kN)	67	76	88	95	100	115
Sección	w_{OBR}					
A						
B					0.0072	0.0219
C		0.0012		0.0413	0.1142	0.0458
D	0.0007	0.0274	0.0139	0.1328	0.0588	0.0414
Promedio	0.0007	0.0143	0.0139	0.1390	0.0601	0.0273
9						0.0014
Promedio						0.0014

En la Tabla 6.21 se muestran los anchos de fisura promedio w_{OBR} , desde el inicio de la fisuración en la región de la viga I-2 instrumentada con SFOD hasta el momento en que apareció la primera fisura en una de las secciones verticales de dicho sensor (la sección 9).

El anterior estado de fisuración según se indica en la Tabla 6.21, correspondió a una carga de 115 kN. A partir de esta condición de carga, se detectaron más fisuras y se calcularon sus anchos. En la Tabla 6.22 se muestra el desarrollo de cada uno de los anchos de fisura calculados.

En ambas tablas se pueden distinguir los anchos de fisura w_{OBR} calculados para las secciones horizontales, y en la parte baja de las mismas tablas y en color gris, los anchos de fisura correspondientes a las secciones verticales, que en la primera viga ensayada no pudieron ser tenidos en cuenta.

En estas tablas también se indican los promedios de los anchos de fisura para cada sección, tanto horizontal como vertical.

Los valores de anchos de fisura que se muestran en las Tablas 6.21 y 6.22 corresponden a las componentes horizontales y verticales de deformación, por lo que para obtener el correspondiente ancho de fisura por cortante, hay que obtener la resultante como se establece en la ecuación 5.5 del capítulo 5.

Tabla 6.22 Ancho de fisura promedio (wOBR) calculado para la viga I-2 (123 a 260 kN)

Q (kN)	123	142	203	213	224	260
Sección	wOBR					
A	0.001	0.046	0.124	0.146	0.233	0.222
B	0.038	0.092	0.236	0.224	0.122	0.148
C	0.025	0.108	0.085	0.120	0.164	0.118
D	0.093	0.069	0.164	0.146	0.175	0.254
Promedio	0.039	0.079	0.152	0.159	0.173	0.185
10			0.055	0.167	0.104	0.223
9	0.031	0.188	0.067	0.158	0.002	0.112
8	0.002	0.039	0.109	0.249	0.031	0.130
7	0.013	0.025	0.438	0.097	0.202	0.135
6		0.008	0.144	0.078	0.109	0.149
5			0.213	0.200	0.034	0.331
4			0.052	0.273	0.035	0.275
3			0.235	0.078	0.173	0.122
2			0.005	0.018	0.130	0.207
1			0.036	0.169	0.070	0.107
Promedio	0.015	0.065	0.135	0.149	0.143	0.179

La resultante de los anchos de fisura promedio por cortante, junto con los valores de desplazamiento que se obtienen de la roseta de deformación colocada en el alma de la viga I-2, se muestran a continuación.

En la comparación de los resultados con ambos tipos de instrumentación, para la viga I-2 se consideraron las lecturas de los potenciómetros diagonales D1 y D2 que se muestran en la Fig. 6.120.

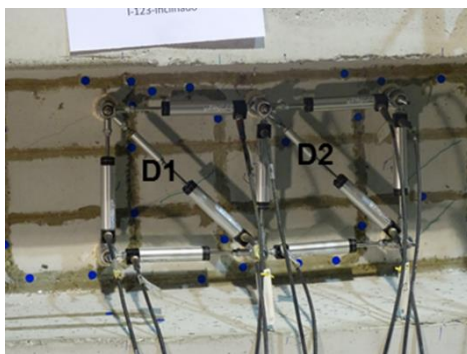


Fig. 6.120 Potenciómetros diagonales de la viga I-2

En la Tabla 6.23 se comparan los anchos de fisura promedio (w_{Pot}) obtenidos en cada uno de los potenciómetros diagonales D1 y D2, con las resultantes de los anchos de fisura (w_{OBR}) de las componentes de las secciones horizontales y verticales del SFOD de la viga I-2.

Tabla 6.23 Comparación de anchos de fisura promedio D1, D2 y w_{OBRt} para la viga I-2

Carga (kN)	D1_ponten (mm)	D2_ponten (mm)	w_{OBRx} (mm)	w_{OBRy} (mm)	w_{OBRt} (mm)
67	0.015	0.001	0.001		0.001
76	0.017	0.001	0.014		0.014
88	0.020	0.001	0.014		0.014
95	0.021	0.000	0.139		0.139
100	0.023	0.000	0.060		0.060
115	0.021	-0.002	0.027	0.001	0.027
123	0.019	0.000	0.039	0.015	0.042
142	0.038	0.048	0.079	0.065	0.102
203	0.192	0.291	0.152	0.135	0.204
213	0.215	0.330	0.159	0.149	0.218
224	0.234	0.354	0.173	0.143	0.225
260	0.337	0.345	0.185	0.179	0.258

A nivel comparativo y en forma general, el orden de magnitud de los anchos de fisura obtenidos en cada tipo de instrumentación es similar, sobre todo para los niveles de carga en los cuales los anchos de fisura comienzan a ser significativos.

Si se recurre a la Tabla 6.11, en la cual se muestran los desplazamientos de todos los potenciómetros que conformaron la roseta de deformación de la viga I-1, se observa que los valores para los potenciómetros diagonales D1 y D2, presentan anchos de fisura similares o incluso mayores a los obtenidos en la viga I-2.

Lo anterior demuestra la importancia de considerar ambas componentes de deformación en el cálculo del ancho de fisura promedio a través del método OBR.

6.2.6.2.3 Viga I-3

De manera similar al ensayo de la viga I-2, para el caso de la viga I-3 se obtuvieron los anchos de fisura w_{OBR} , tanto para las secciones horizontales como verticales del SFOD.

En las Tablas 6.24 y 6.25 se presentan los valores del ancho de fisura w_{OBR} calculados para la viga I-3 y los promedios para cada sección.

Tabla 6.24 Ancho de fisura promedio (w_{OBR}) calculado para la viga I-3 (158 a 207 kN)

Q (kN)	158	163	169	171	203	207
Sección	w_{OBR}					
A						
B						0.0127
C				0.0001	0.0145	0.0147
D	0.0023	0.0160	0.0010	0.0129	0.0223	0.0409
Promedio	0.0023	0.0160	0.0010	0.0033	0.0092	0.0171
10		0.0003	0.1166	0.0018	0.0289	0.0158
9		0.1166	0.0002	0.0006	0.0182	0.0625
8				0.0002	0.0274	0.0058
7			0.0002		0.0005	0.0005
6		0.0001		0.0208	0.0005	0.0005
5						
4						
3						
Promedio		0.0142	0.0142	0.0029	0.0094	0.0109

En ambas tablas se indican por separado las componentes horizontales de los anchos de fisura para las secciones A, B, C y D, y los anchos de fisura correspondientes a las secciones verticales 3 a 10.

Se observa que, a diferencia de la viga I-2, en la que las primeras fisuras se detectaron en secciones horizontales, y solamente después y a niveles de carga superiores, se presentaron fisuras en las secciones verticales, en la viga I-3 aparecen fisuras en ambas direcciones prácticamente en forma simultánea.

Una vez calculados los anchos de fisura por el método OBR, se procedió a realizar la comparación de los anchos de fisura calculados, con los obtenidos en forma experimental por medio de la roseta de deformación colocada en el alma de la viga I-3. La conformación de esta roseta se muestra en la Fig. 6.121.

Tabla 6.25 Ancho de fisura promedio (w_{OBR}) calculado para la viga I-3 (222 a 258 kN)

Q (kN)	222	224	232	245	258
Sección	w_{OBR}				
A					0.0465
B	0.0205	0.0368	0.0541	0.0304	0.0598
C	0.0373	0.0755	0.1516	0.0938	0.0731
D	0.0589	0.0207	0.0391	0.0669	0.0546
Promedio	0.0292	0.0333	0.0612	0.0478	0.0585
10	0.0442	0.0423	0.0483	0.1480	0.1967
9	0.0836	0.0384	0.0723	0.0736	0.1104
8	0.0548	0.0300	0.0461	0.0735	0.1105
7	0.0725	0.0106	0.0130	0.0085	0.0161
6	0.0347	0.0165	0.0088	0.0485	0.0242
5	0.0146	0.0198	0.1090	0.0322	0.0111
4	0.0013	0.0622	0.0212	0.0102	0.0244
3	0.0098		0.0029	0.0025	0.0027
Promedio	0.0391	0.0277	0.0410	0.0496	0.0619

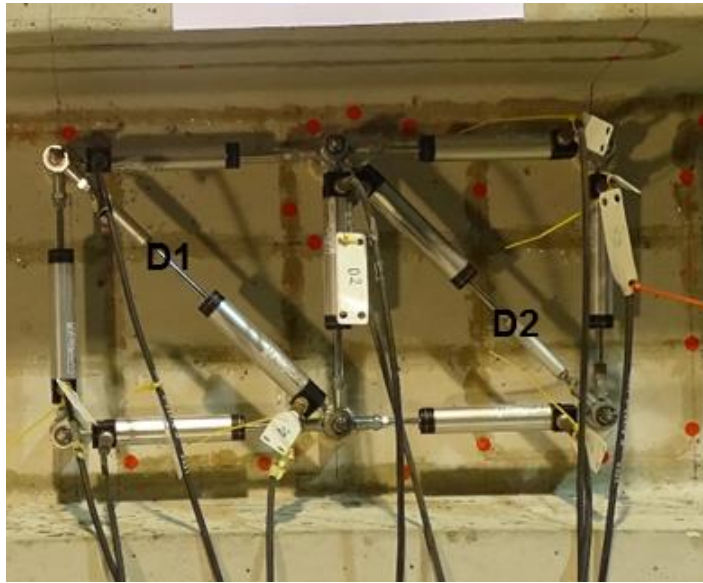


Fig. 6.121 Potenciómetros diagonales de la viga I-3

En la Tabla 6.26, se comparan los anchos de fisura promedio (w_{Pot}) obtenidos en cada uno de los potenciómetros diagonales, con las resultantes de los anchos de fisura (w_{OBR}) de las componentes de las secciones horizontales y verticales del SFOD de la viga I-3.

Tabla 6.26 Comparación de anchos de fisura promedio D1, D2 y w_{OBRt} para la viga I-3

Carga (kN)	D1 (mm)	D2 (mm)	w_{OBRx} (mm)	w_{OBRy} (mm)	w_{OBRt} (mm)
159	0.013	0.016	0.002	0.000	0.002
163	0.012	0.017	0.004	0.014	0.015
169	0.013	0.017	0.000	0.014	0.014
172	0.013	0.017	0.003	0.003	0.004
203	0.017	0.020	0.009	0.009	0.013
207	0.017	0.021	0.017	0.011	0.020
222	0.029	0.000	0.029	0.039	0.049
224	0.030	-0.005	0.033	0.028	0.043
232	0.033	-0.021	0.061	0.041	0.074
246	0.040	-0.033	0.048	0.050	0.069
258	0.092	0.014	0.073	0.062	0.096

Nuevamente se pudo comentar que a nivel comparativo y en forma general, el orden de los anchos de fisura obtenidos en cada tipo de instrumentación es similar. En este caso los anchos de fisura obtenidos con el potenciómetro D1 (Fig. 6.121) y los valores resultantes w_{OBRt} resultan similares. Con excepción de algunos casos de carga como el correspondiente al inicio de la fisuración a 159 kN. En este caso se observa que el potenciómetro D1 indica un desplazamiento de 0.13 mm y la resultante w_{OBRt} muestra un valor de 0.002, el cual muy distinto al primero.

Sin embargo posteriormente, los demás casos de carga presentan valores de ancho de fisura muy similares entre sí. Se observa con relación a los anchos de fisura obtenidos con los potenciómetros diagonales en las dos vigas anteriores, que en el caso de la viga I-3, los anchos de fisura calculados y medidos son significativamente menores.

Lo anterior está relacionado con la mayor resistencia que ofrece la viga I-3 con respecto a las vigas I-1 e I-2. En la viga I-3 la primera fisura en la región sujeta a cortante se detectó a los 158 kN, mientras que en las otras vigas fue de alrededor de los 60 y 67 kN.

También al observar los patrones de fisuración de cada viga, se aprecia que para niveles de carga similares, la viga I-3 presenta un nivel de daño acumulado menor.

6.2.7 Ensayo a flexión de la viga I-3

La parte final de este capítulo describe la monitorización del ensayo a flexión de la viga I-3. De forma similar al caso anterior, la viga se instrumentó con una serie de sensores convencionales discretos (Celada, 2015) y como complemento se utilizó un SFOD adherido a su superficie para la medida de deformaciones longitudinales. Cabe mencionar que esta viga fue ensayada primero a cortante y posteriormente a flexión, por lo que desde el inicio del ensayo los registros de deformación mostraron la presencia de daño en la viga. También con esta viga y teniendo en cuenta las condiciones de daño iniciales, se aplicó el método OBR para la detección y localización de fisuras.

6.2.7.1 Comportamiento del sistema OBR durante el ensayo

De forma similar a los ensayos a cortante, se registraron las deformaciones producidas en la viga bajo una carga estática, aplicada en forma gradual, en seis ciclos de carga y descarga. La fuerza aplicada fue controlada por desplazamiento de 1 y 2 mm/minuto, hasta llegar a la rotura de la viga por flexión.

Sin embargo durante este ensayo, el sistema OBR presentó problemas para capturar la información a partir de un nivel de carga aproximado de 295 kN. Por lo anterior, el ensayo se tuvo

que concluir limitando la información obtenida con el sistema OBR al nivel de carga mencionado, tal como se muestra en la Fig. 6.122.

6.2.7.2 Resultados. Comportamiento de la viga I-3 previo a la carga

Resulta interesante observar el estado de la viga I-3 previo al inicio del ensayo a flexión y durante los primeros incrementos de carga. En las Figs 6.123 y 6.124 se muestran las deformaciones obtenidas por medio del sistema OBR a un nivel de carga nulo y bajo una ligera carga de 2 kN.

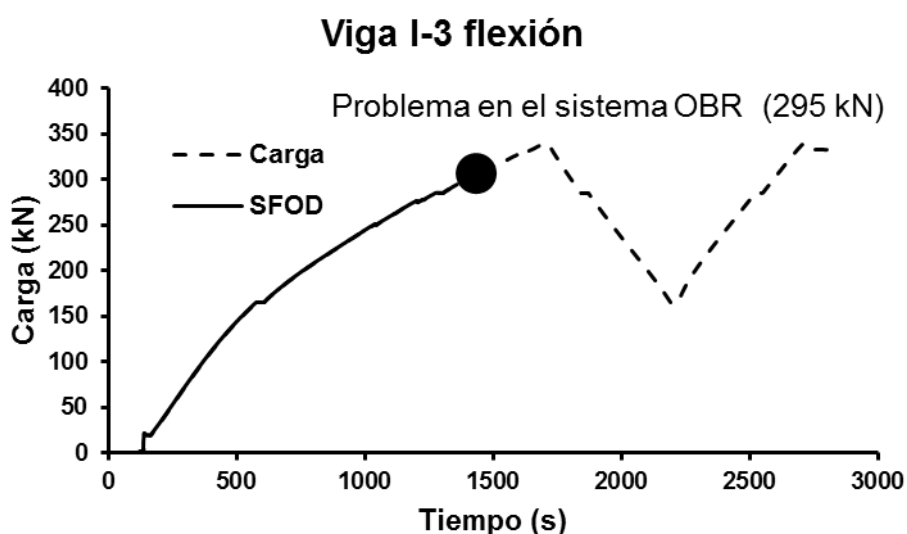


Fig. 6.122 Historia parcial de carga y registro con el SFOD del ensayo de la viga I-3 a flexión

En la Fig. 6.123 se aprecia como las secciones A y B del SFOD que se encuentran en la parte superior de la viga, y cuya deformación se representa con una línea continua, se encuentran en tracción, mientras que las secciones C y D del SFOD que se ubican en la parte inferior y que se representan con línea punteada, están en compresión.

Lo anterior se puede entender como el efecto compensatorio de las cargas que ejerce el pretensado parcial. . También en la parte baja de esta figura, se muestran en forma simultánea los niveles de deformación en las secciones superiores del SFOD A y B, y las secciones inferiores C y D.

Aquí se aprecia que las dos secciones colocadas en la parte superior de la viga, muestran niveles de deformación a tracción muy similares en ambas secciones. De igual forma, las secciones inferiores muestran valores de deformación a compresión igualmente semejantes.

También en la Fig. 6.123, se observa en las dos secciones inferiores C y D del SFOD, una región en la que se distingue la presencia de picos de deformación. Estos picos se pueden asociar a la presencia de las fisuras que se han producido en la viga durante el ensayo a flexión y que se han cerrado momentáneamente. Estas fisuras se muestran en la Fig. 5.37 del capítulo 5.

La Fig. 6.124 muestra un estado de deformaciones en la viga I-3 muy similar al estado previo al inicio de la aplicación de la carga. En esta figura la viga tiene una carga de sólo 2 kN, y las deformaciones que se muestran, son prácticamente las mismas que en la Fig. 6.123

Viga I-3 (0 kN)

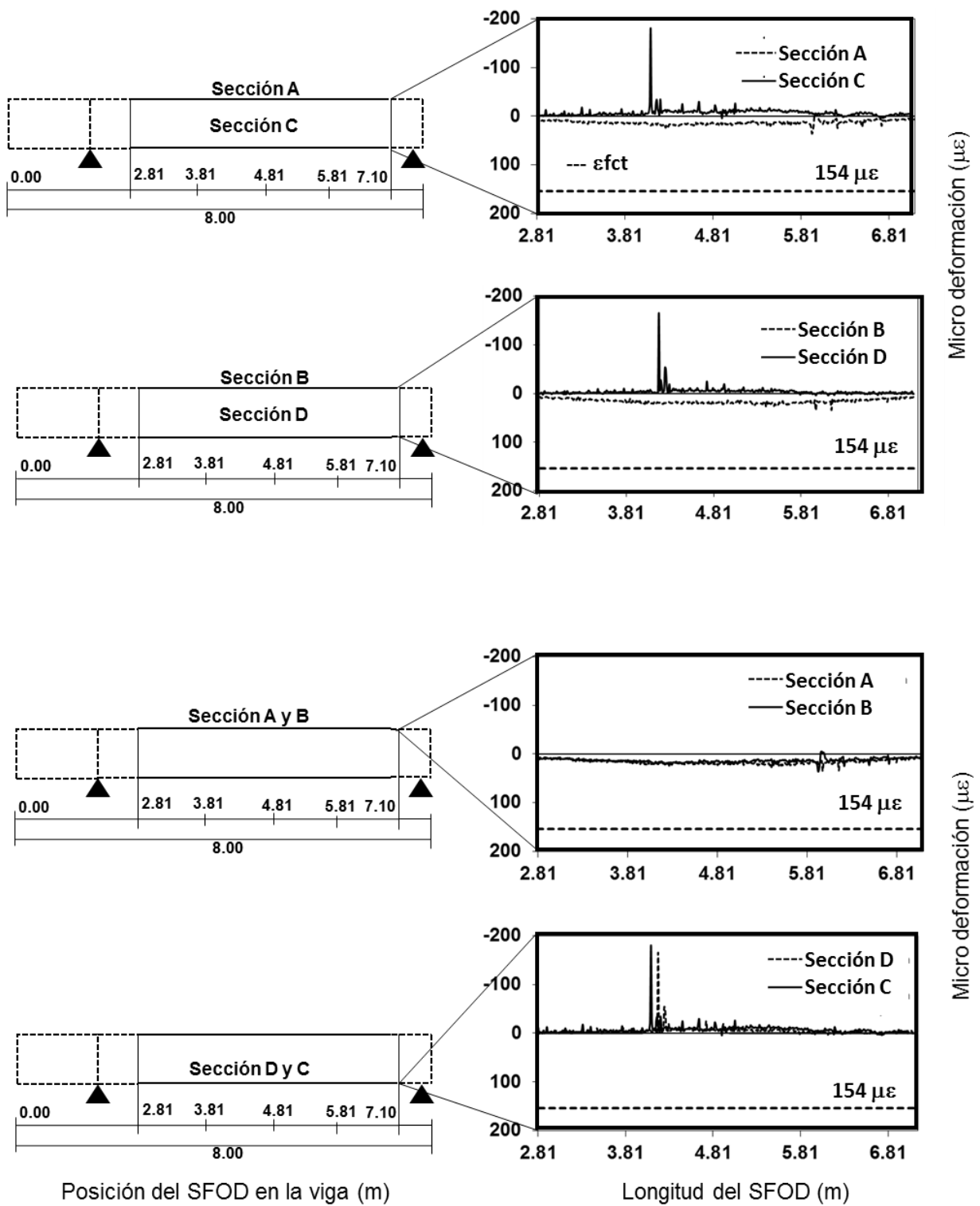


Fig. 6.123 Estado de deformaciones previo al ensayo a flexión de la viga I-3

Viga I-3 (2 kN)

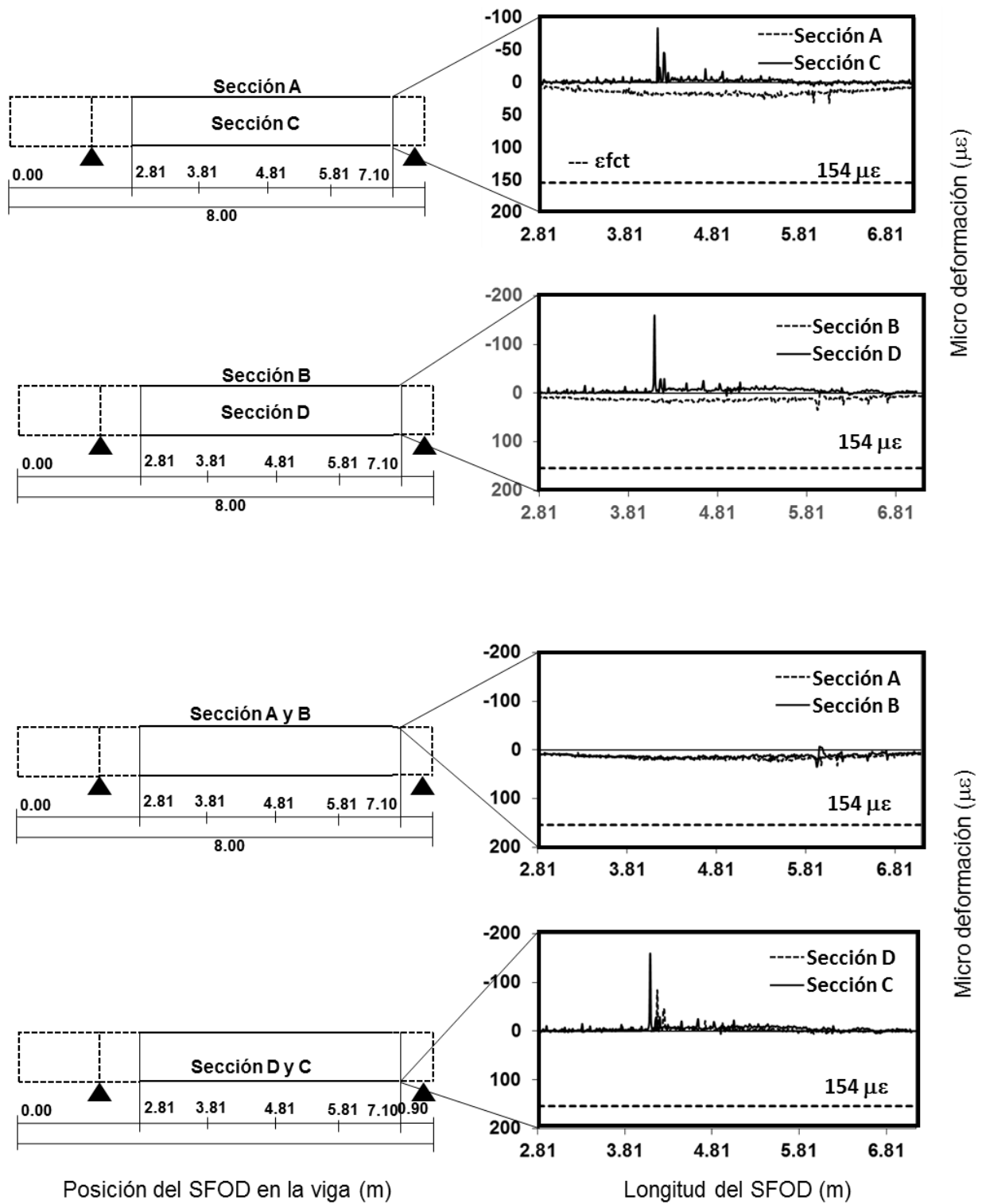


Fig. 6.124 Estado de deformaciones en ensayo a flexión de la viga I-3 a 2 kN

6.2.7.3 Detección y localización de puntos de fisuración por medio de los SFOD

Posteriormente y para niveles de carga superiores, se pudo obtener el estado de deformación de la viga I-3 en las secciones A, B, C y D del SFOD. En las Figs. 6.125 y 6.126 se muestra la distribución de las deformaciones para los niveles de carga de 21.5 y 40.5 kN respectivamente.

En la Fig. 6.125 se aprecia primeramente como los estados de deformación de las secciones que conforman el SFOD se han invertido. Ahora las secciones A y B, colocadas en la parte superior de la viga, presentan compresión, y las secciones inferiores C y D se encuentran en tracción.

Los niveles de deformación de las secciones indican valores inferiores a las $-50 \mu\epsilon$ para las secciones superiores A y B, y casi en forma simétrica valores menores a $50 \mu\epsilon$ en la parte central de la viga.

También se aprecia que los picos de compresión en las Figs. 6.123 y 6.124, ahora se encuentran en tracción y algunos de ellos con valores muy cercanos al umbral de deformación por tracción (ϵ_{ft}) establecido para la viga I-3 sujeta a flexión, y que es de $152 \mu\epsilon$ (Tabla 5.2 capítulo 5).

En la Fig. 6.126, a un nivel de carga de 40.5 kN se presenta por primera vez que un pico de la sección D del SFOD en la parte inferior de la viga I-3 presenta un valor superior a las $152 \mu\epsilon$.

Con el mismo criterio que se estableció para la identificación y localización de los casos de cortante, a este punto de fisuración se le denominó D1.

A partir de su identificación y conforme el nivel de carga aumentó, se detectaron y localizaron más puntos de fisuración.

A medida que el nivel de carga aumentó, la aparición de puntos de fisuración aumentó también considerablemente, llegándose a identificar un gran número de puntos asociados a supuestas fisuras.

En las Figs. 6.127 a 6.132 se muestran una serie de casos de carga que se estudiaron a flexión. En estas figuras se distingue la forma en la que se fueron detectando los principales puntos de fisuración.

Una de las razones por las cuales a niveles de carga posteriores el SFOD detectó un gran número de picos, fue el estado de daño que presentaba la viga desde el inicio del ensayo. El que ya existiera un buen número de fisuras de ancho considerable en la zona instrumentada a flexión, fue una de las principales afectación que sufrieron las lecturas realizadas con forme el nivel de carga aumentó.

Viga I-3 (21.5 kN)

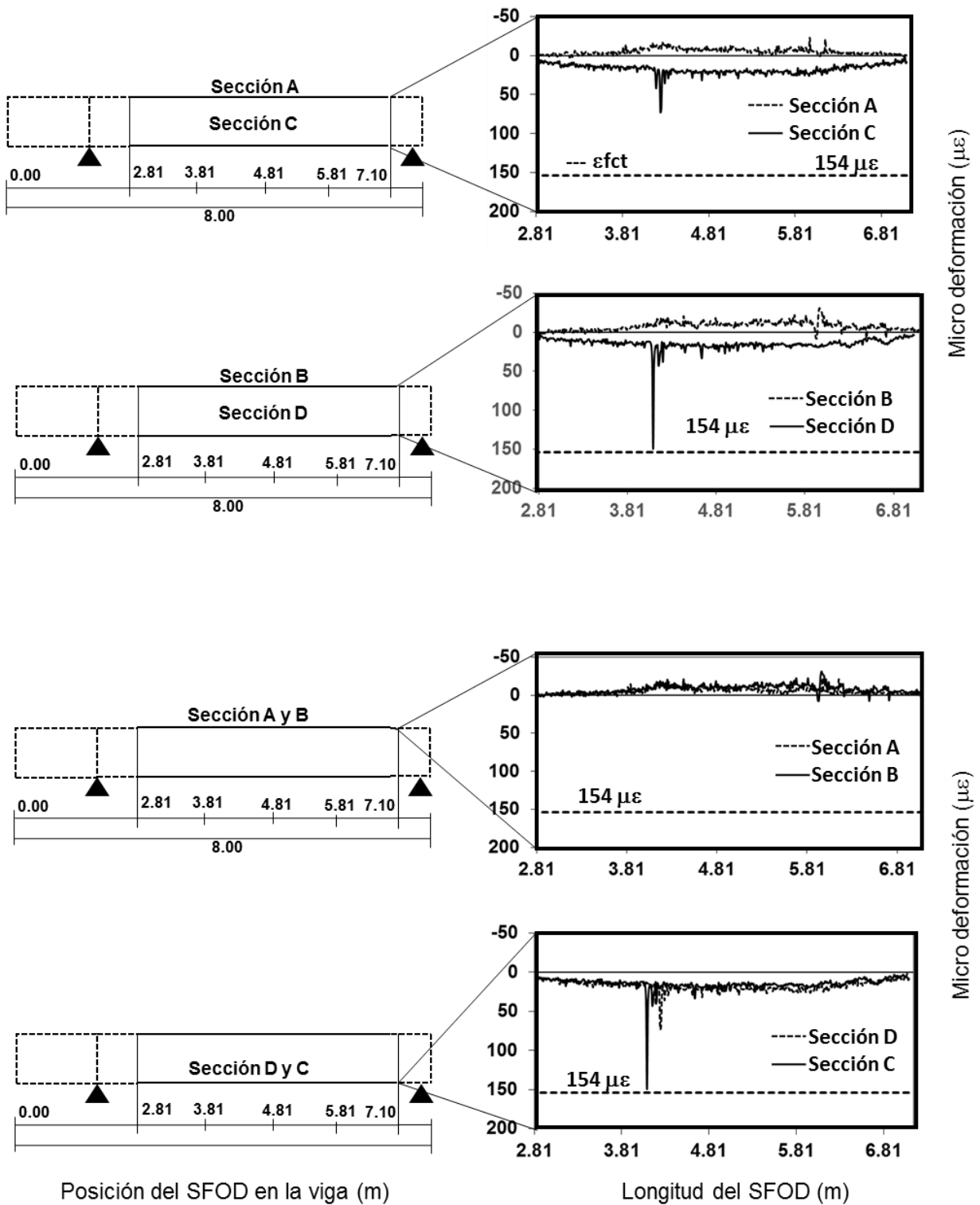


Fig. 6.125 Estado de deformaciones en ensayo a flexión de la viga I-3 a 21.5 kN

Viga I-3 (40.5 kN)

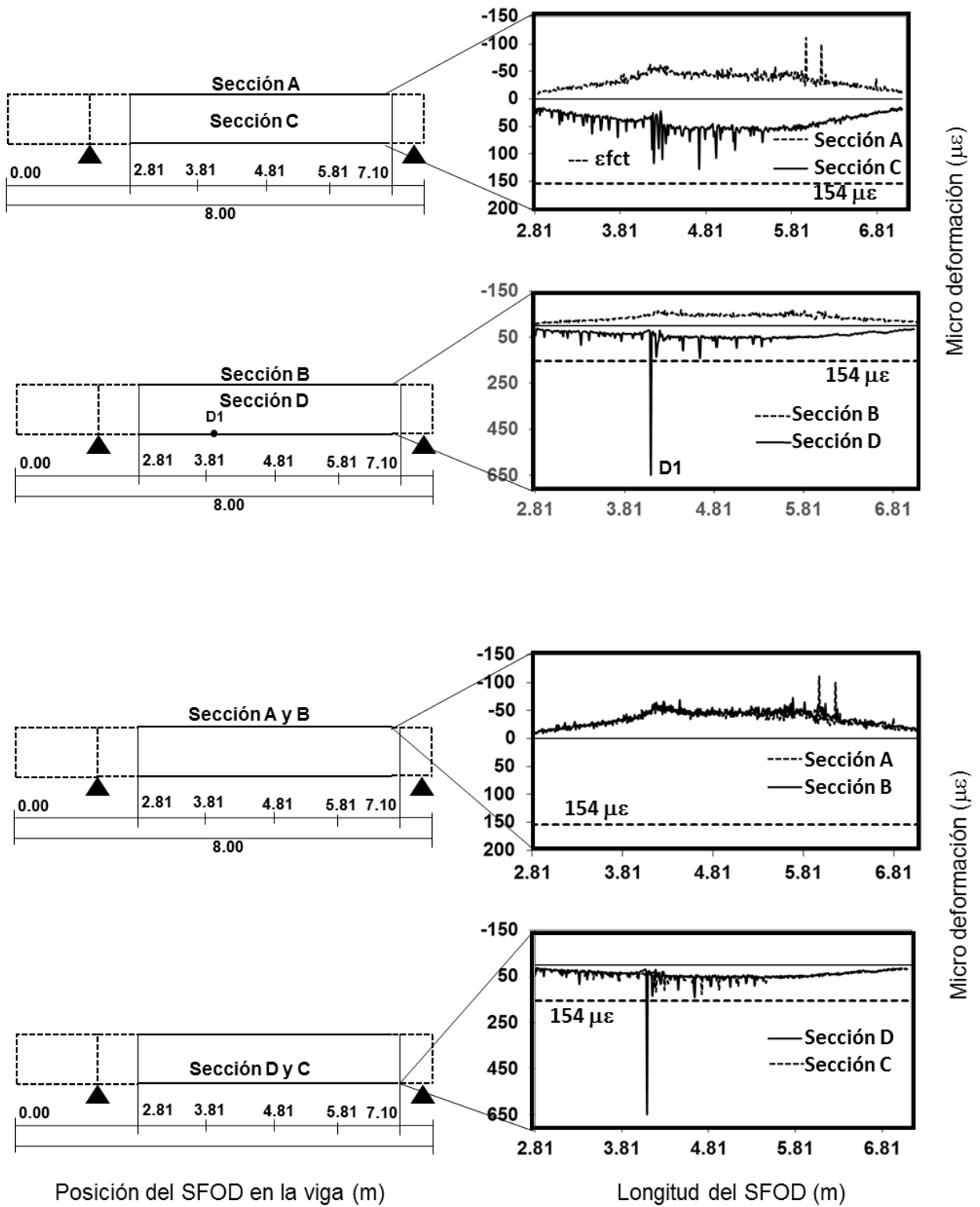


Fig. 6.126 Estado de deformaciones en ensayo a flexión de la viga I-3 a 40.5 kN

Viga I-3 (61 kN)

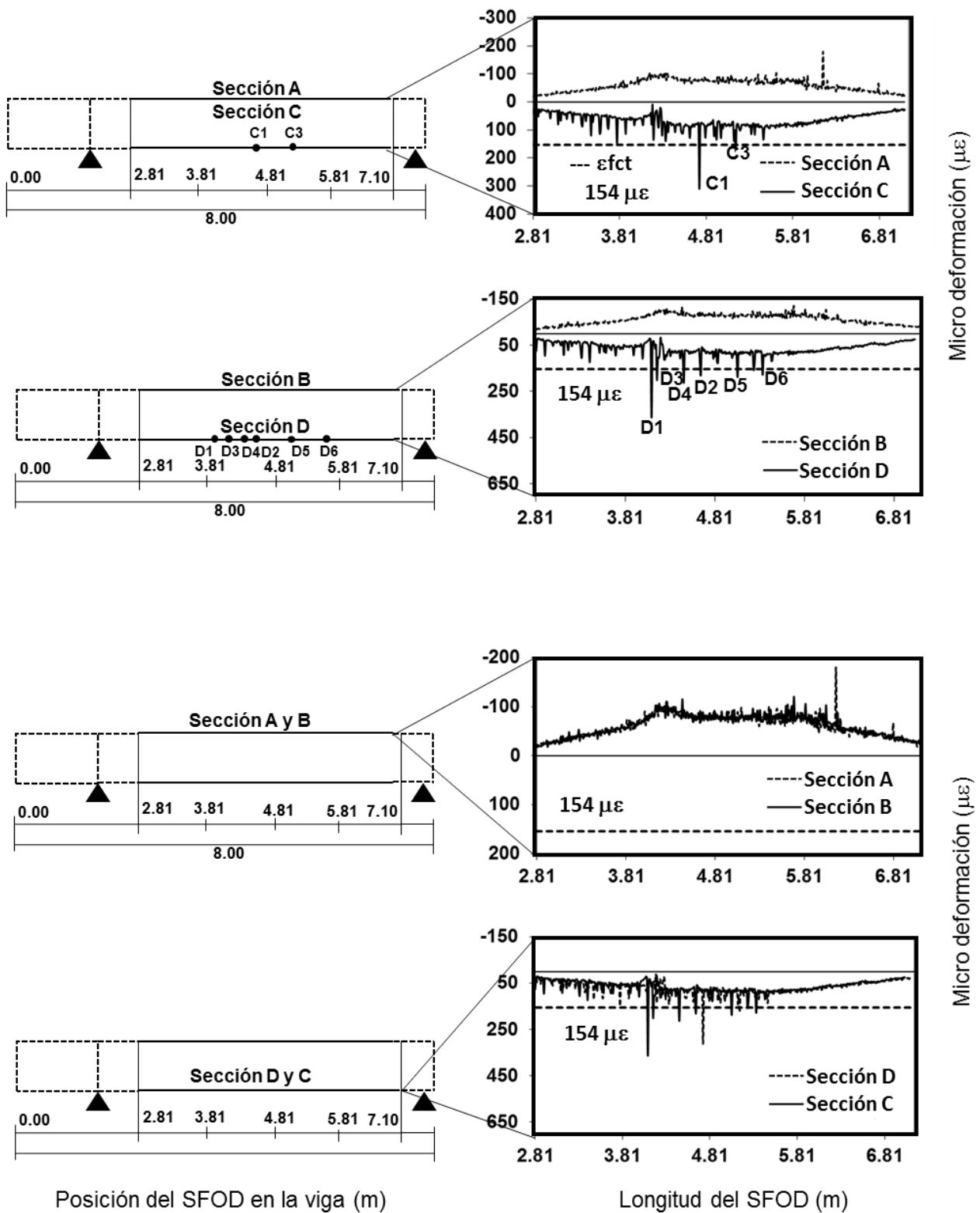


Fig. 6.127 Estado de deformaciones en ensayo a flexión de la viga I-3 a 61 kN

Viga I-3 (100 kN)

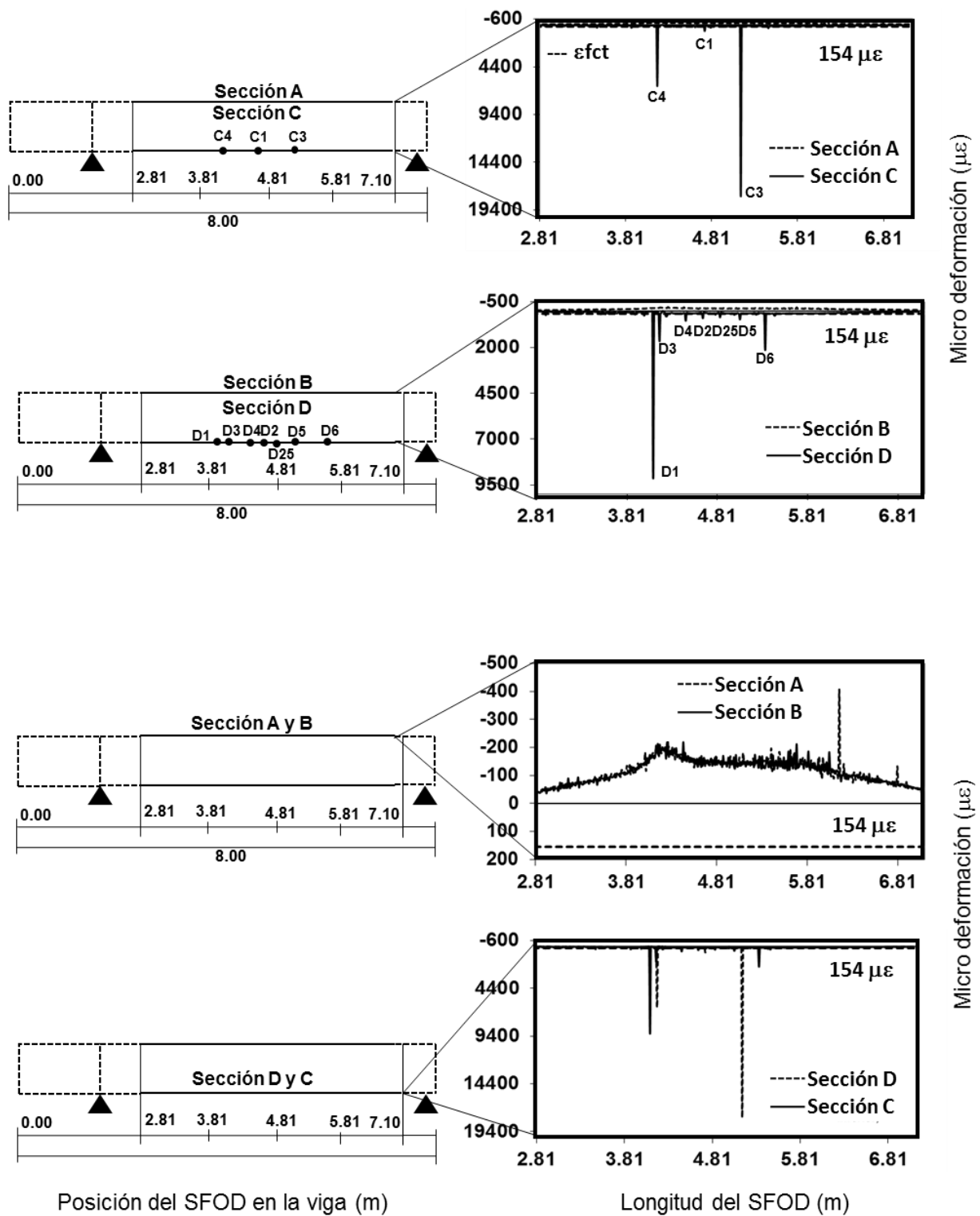


Fig. 6.128 Estado de deformaciones en ensayo a flexión de la viga I-3 a 100 kN

Viga I-3 (125 kN)

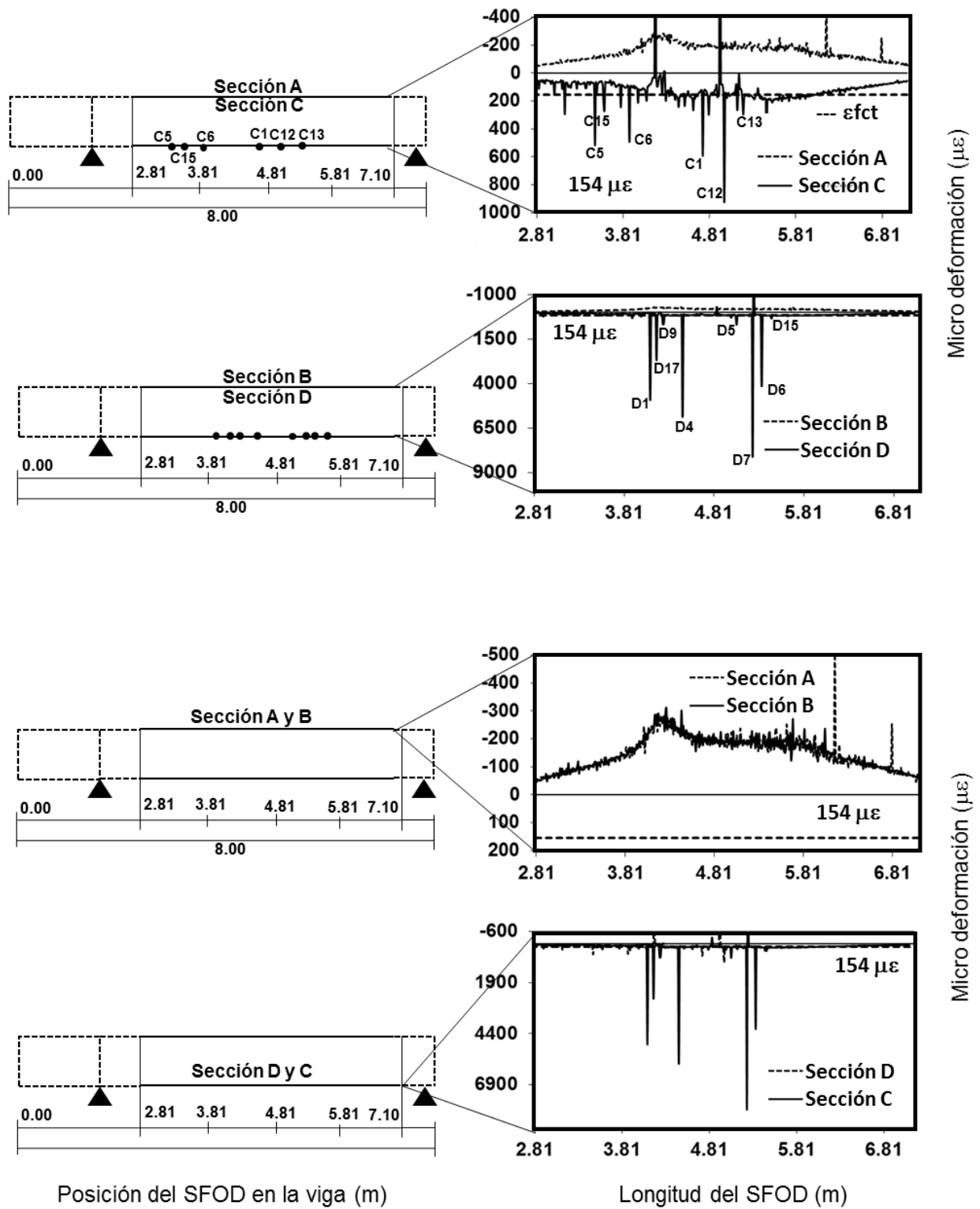


Fig. 6.129 Estado de deformaciones en ensayo a flexión de la viga I-3 a 125 kN

Viga I-3 (150 kN)

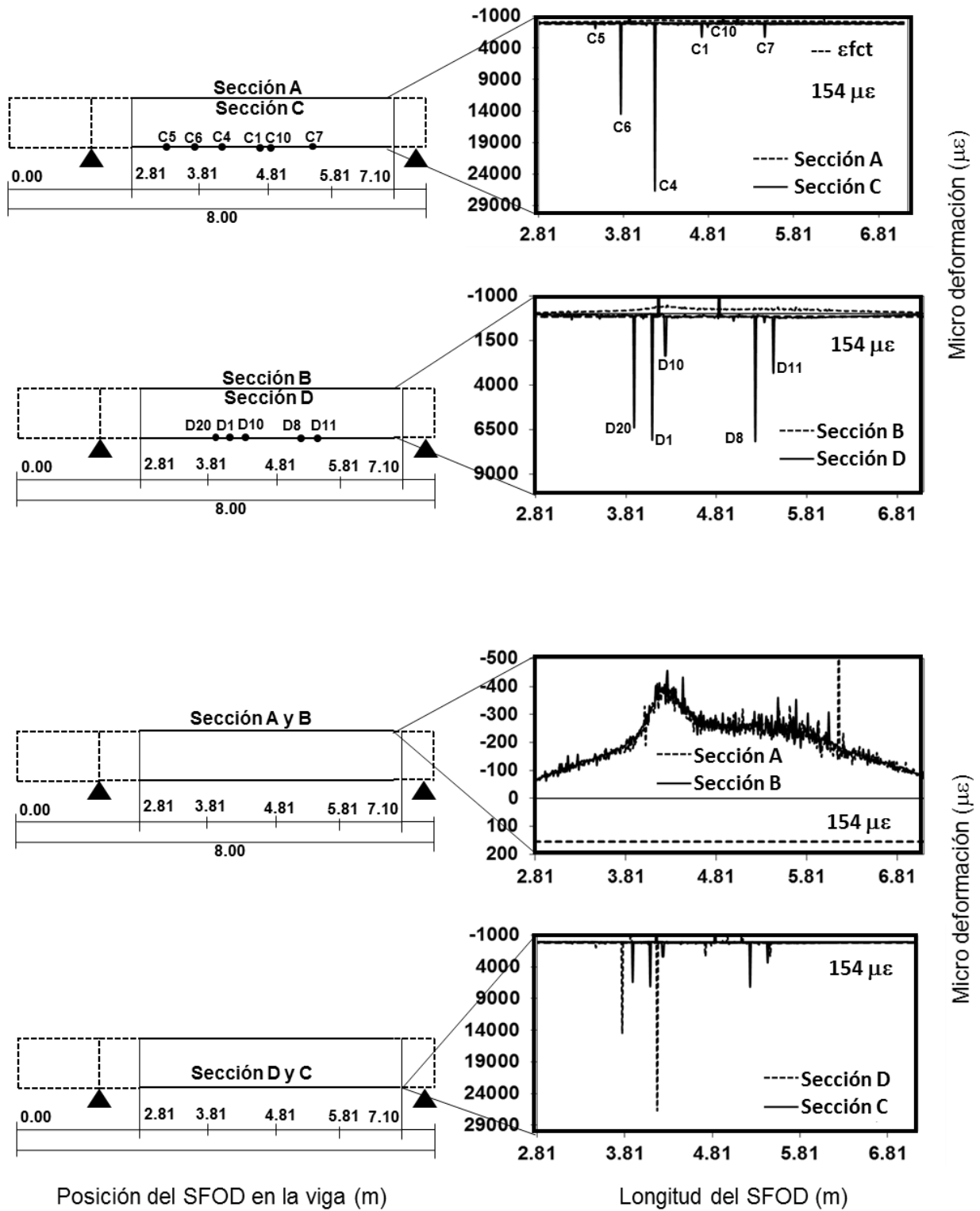


Fig. 6.130 Estado de deformaciones en ensayo a flexión de la viga I-3 a 150 kN

Viga I-3 (200 kN)

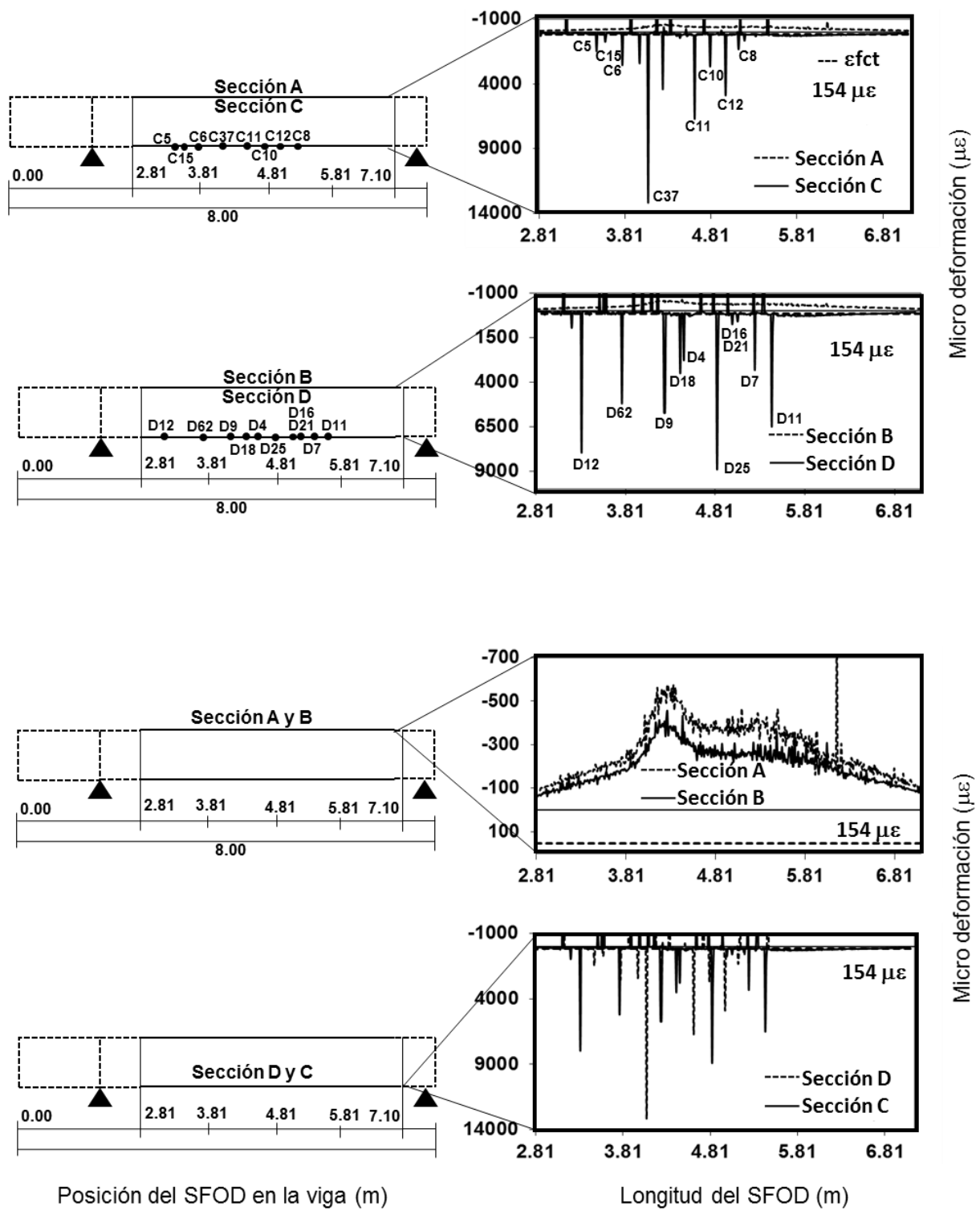


Fig. 6.131 Estado de deformaciones en ensayo a flexión de la viga I-3 a 200 kN

Viga I-3 (250 kN)

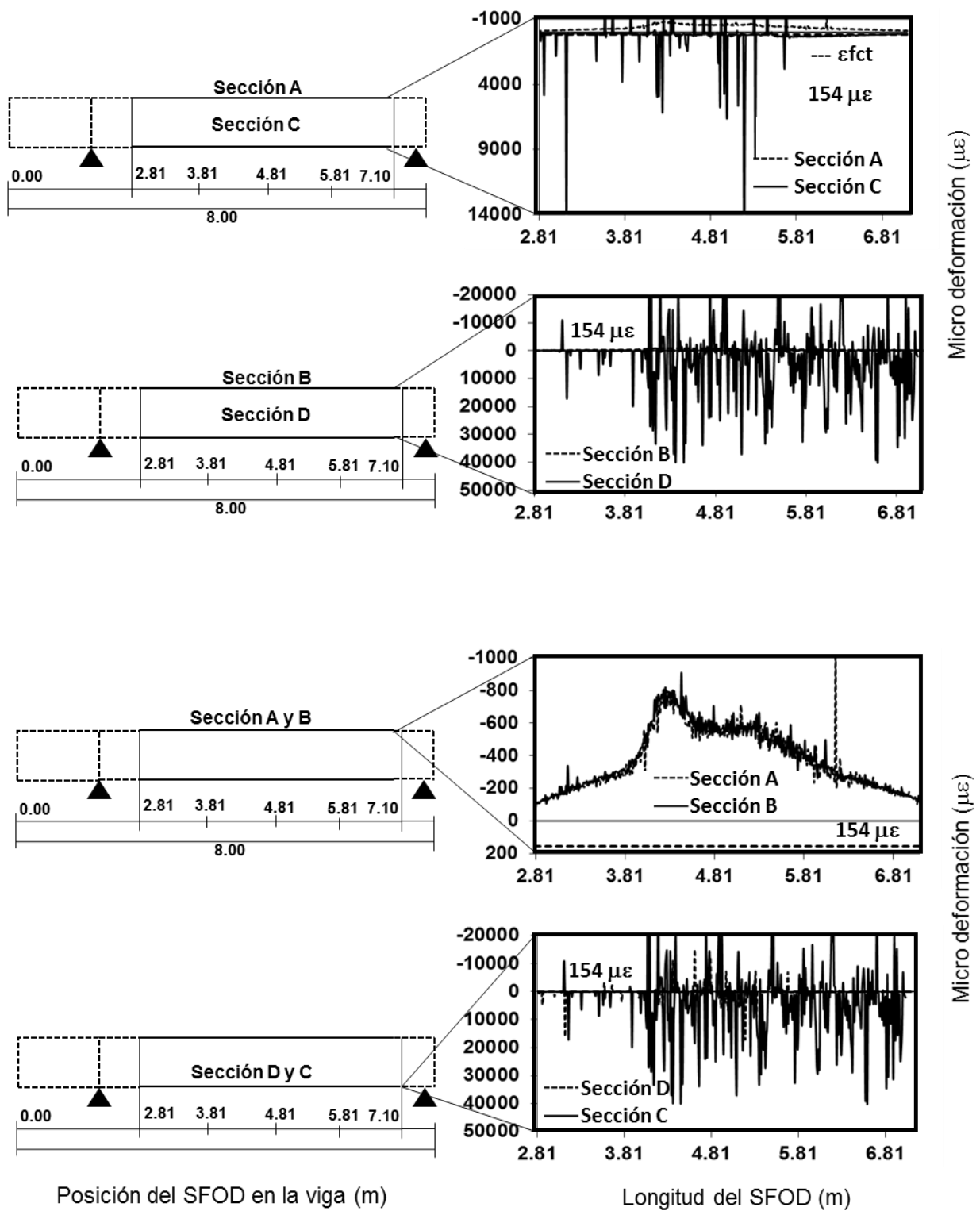


Fig. 6.132 Estado de deformaciones en ensayo a flexión de la viga I-3 a 250 kN

En la Tabla A.14 del anexo A se muestra la identificación y localización de los puntos de fisuración detectados en las secciones C y D sujetas a flexión en la parte inferior de la viga I-3.

La Tabla A.14 correspondiente a la identificación de los posibles puntos de fisuración en la sección C del SFOD, se muestra en forma progresiva la aparición de cada punto con relación al nivel de carga.

En este sentido, la primera fisura de esta sección aparece a los 47 kN y es a partir de la identificación de este punto, que se identifican más picos de fisuración cuyo valor máximo es superior al umbral de deformación por tracción máximo de $152\ \mu\epsilon$. También se observa que la mayoría de los puntos de fisuración que se muestran en la Tabla A.14, aparecen simultáneamente a un mismo nivel de carga, por lo que a un nivel de carga de 75 kN ya se han identificado un gran número de fisuras.

Posteriormente y como se muestra entre las Figs. 6.127 a 6.132 el número de fisuras que se identifican se va elevando considerablemente. Sin embargo se identifican fisuras que tienen un pico con una amplitud considerable, y son las que se consideran como fisuras ocasionadas por el ensayo.

La aparición de otros picos en las lecturas, se debe de asociar a otras causas y no precisamente a la aparición de fisuras. Dichas causas deben ser investigadas en el futuro.

En el caso de la identificación de fisuras en la sección D (Tabla A.14) es similar al de la sección C, conforme el nivel de carga aumentó, las fisuras en la sección D también aparecen en gran número.

Para la identificación y verificación de estos puntos de fisuración, se recurre a un apoyo de tipo fotográfico, con el fin de corroborar la existencia de fisuras a flexión y su correspondiente localización a través del SFOD.

Lo anterior se realiza para un nivel de carga en el cual la fibra óptica aún no presentaba los problemas de captura de información que se han indicado al principio de esta sección.

En las Figs. 6.131 y 6.132 que corresponden a los estados de deformación por flexión a niveles de carga de 200 y 250 kN respectivamente, ya se aprecian algunos problemas en la captura de la información por medio del sistema OBR.

Estos problemas se identifican solamente en las secciones inferiores C y D del SFOD. En la Fig. 6.131 las secciones A y B del SFOD identifican con una gran precisión el estado de deformaciones a compresión bajo el cual se encuentran trabajando estas dos secciones.

De forma contraria, las secciones inferiores C y D que se encuentran a flexión, que atraviesan fisuras de un tamaño importante y cuyas lecturas están influidas por la apertura de nuevas fisuras, comienzan a presentar lecturas tanto en tracción como en compresión en forma aleatoria. Dicho problema es similar al que se presentó en los ensayos a cortante conforme las vigas ensayadas se encontraban sujetas a niveles de deformación y carga más elevados.

Posteriormente a un nivel de carga de 250 kN que es el que se muestra en la Fig. 6.132, las secciones inferiores C y D muestran un comportamiento totalmente caótico y sin relación física con el fenómeno de flexión que se está monitorizando. De manera contraria, las secciones A y B del mismo SFOD que se encuentran en compresión, muestran un comportamiento aceptable.

Lo anterior indica que el SFOD no ha fallado, no ha sufrido una rotura, y que la información que ofrece, puede ser válida en un parte de su longitud total, y en otra puede presentar problemas debidos principalmente al estado de daño que presenta la superficie sobre la cual se encuentra adherido.

De las anteriores observaciones se desprende que en el caso del ensayo de la viga I-3 sujeta a flexión, pero con un nivel de daño importante desde el inicio del ensayo, el sistema OBR presenta limitaciones para detectar, localizar y sobre todo cuantificar los anchos de fisura promedio después de cierto nivel de deformaciones.

Lo anterior, y por el estado de conocimiento que se tiene por el momento de la aplicación del sistema OBR en la detección de fisuras en superficies no homogéneas, resulta una posible limitación en cuanto a la aplicación del sistema OBR en la detección de niveles muy importantes de fisuración o bien en su adherencia a superficies previamente fisuradas. Este es otro de los temas que habrá que estudiar como futura línea de investigación.

Sin embargo, y como se ha mencionado para el caso de este ensayo a flexión, el sistema OBR ofrece la posibilidad de dar información para detectar y localizar fisuras por flexión hasta cierto nivel de carga y deformación, muy superiores, en cualquier caso, a los niveles normales de servicio de estructuras de hormigón

En la Fig. 6.133 se muestra la detección y localización de fisuras a flexión en la viga I-3 a un nivel de carga de 125 kN.

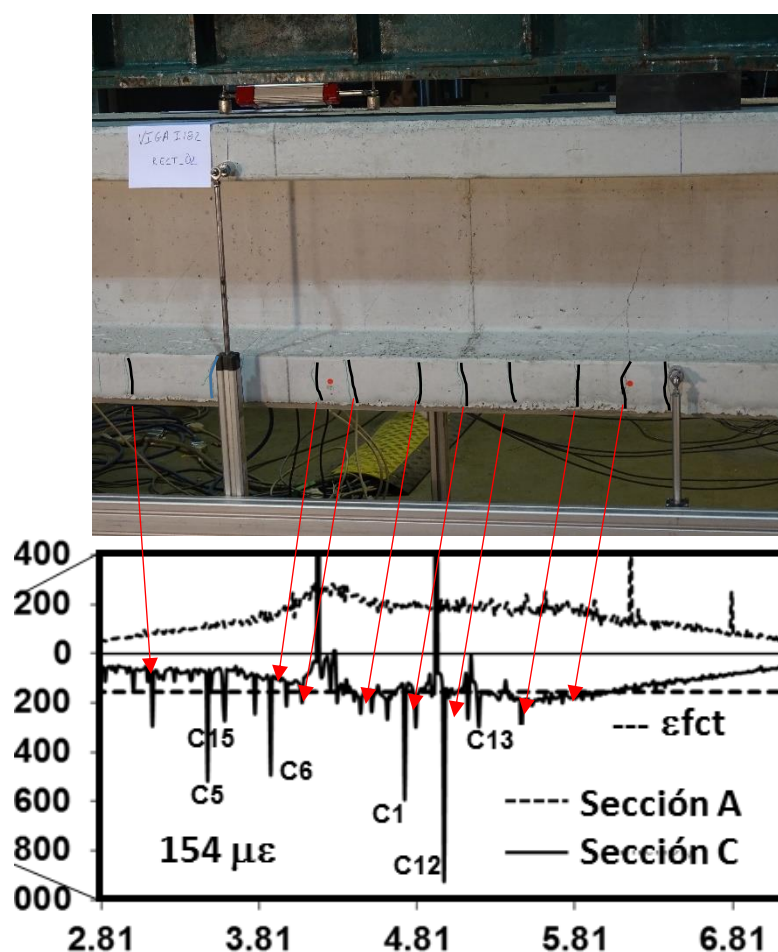


Fig. 6.133 Estado de deformaciones en ensayo a flexión de la viga I-3 a 125 kN

6.2.8 Conclusiones

Las aplicaciones realizadas en laboratorio, tuvieron la finalidad principal de estudiar el potencial de los SFOD en el estudio de la fisuración a cortante en estructuras de hormigón. Gracias a su carácter distribuido, se conformaron mallas 2D a partir de las cuales se ha podido establecer una metodología para no solamente detectar fisuras, sino también localizarlas con una buena precisión, y poder conformar así la historia de los distintos patrones de fisuración de cada una de las vigas ensayadas.

A través de los tres ensayos realizados, se ha mostrado el potencial que tiene la información que se adquiere del sistema OBR para detectar daño por fisuración. Así, en primera instancia, los picos que aparecen en los registros de deformación se pueden asociar con la presencia de fisuras, que gracias a la alta resolución y sensibilidad del sistema, han sido detectadas incluso antes de que puedan ser vistas durante una inspección.

De la comparación de los anchos de fisura promedio obtenidos con la instrumentación convencional y los SFOD, se observa en general una buena congruencia entre ambos. Con ambos sistemas se obtuvo que la viga I-3 es la que presenta menores anchos de fisura promedio y por tanto un menor daño a cortante durante los ensayos. Lo anterior se pudo comprobar gracias a la conformación de los patrones de fisuración por cortante de las tres vigas ensayadas por medio de la información obtenida con los SFOD y el sistema OBR. De la obtención de estos patrones de fisuración, se observó que a niveles de carga similares, el número de fisuras, y su ancho promedio fue menor en la viga I-3 que en las vigas I-1 e I-2.

También como se ha mencionado en este capítulo, la detección, localización y cálculo de ancho de fisura por cortante tuvo una limitante en este trabajo. Los SFOD utilizados, presentaron problemas para obtener información confiable en los puntos de fisuración a partir de las 10,000 $\mu\epsilon$, deformaciones asociadas en estos ensayos con niveles de carga entre los 250 y los 265 kN.

En este sentido se debe indicar, que la información de los ciclos de carga y descarga posteriores puede ser analizada en trabajos futuros, ya que existe una gran cantidad de información que puede ser útil para estudiar con mayor profundidad en comportamiento de cada una de las vigas. En este trabajo no se llegó a ese nivel de análisis, debido principalmente a que se trata de un trabajo pionero en el cual, por los tiempos y al volumen de información generada, se tuvo que dar prioridad al establecimiento de la metodología para detectar, localizar y cuantificar fisuras.

Con el ensayo a flexión, se concluyeron los trabajos experimentales en laboratorio referentes a la aplicación del sistema OBR en la monitorización de estructuras de hormigón. De igual manera, en el ensayo a flexión se obtuvieron resultados de interés y se encontraron limitaciones aparentes en el uso de los SFOD, pero se sentaron las bases para seguir investigando y mejorando su aplicación.

En el caso de la viga a flexión, se observó que al presentar un nivel de daño importante desde el inicio del ensayo, el sistema OBR presenta limitaciones para detectar, localizar y sobre todo cuantificar los anchos de fisura promedio después de cierto nivel de deformaciones.

Por el estado de conocimiento que actualmente se tiene en cuanto a la aplicación del sistema OBR en la detección de fisuras, la aplicación de este sistema de monitorización en superficies no homogéneas con fisuras previas de anchos considerables, presente una posible limitación.

CAPÍTULO 7

MONITORIZACIÓN TEMPORAL DEL PROCESO DE AMPLIACIÓN DE UN PUENTE URBANO DE HORMIGÓN PRETENSADO CON UN SISTEMA OBR

7.1 Introducción

En este capítulo, se muestra la aplicación del sistema OBR en una estructura real, parcialmente en servicio, y en un proceso de remodelación que afecta su comportamiento estructural. La estructura en estudio es un puente urbano de hormigón pretensado de aproximadamente 86 m de longitud. El puente fue instrumentado con dos SFOD en el interior de su sección y monitorizado a través del uso del sistema de medición OBR, desde el inicio del proceso de remodelación hasta su finalización. Se realizaron diferentes etapas de monitorización temporal, a lo largo de casi ocho meses.

Los efectos en los SFOD debidos a los cambios de temperatura, pudieron ser considerados al aplicar técnicas de compensación. Sin embargo, cabe aclarar que al no contar con sensores para medir la temperatura ambiente y la humedad, la adecuada medición de las condiciones ambientales es un aspecto importante que limita la interpretación de los resultados.

7.2 Comportamiento de los SFOD en condiciones ambientales

En condiciones ideales, un SFOD adherido a un sistema estructural, debería solamente responder a las fuerzas externas aplicadas a dicho sistema, y permanecer indiferente a las variaciones de las condiciones térmicas del ambiente. Este comportamiento solamente se considera como válido, cuando alguna clase de SFO, se utiliza en ensayos de laboratorio bajo condiciones controladas de temperatura.

Generalmente, en los laboratorios la temperatura es estable, por lo que en la práctica común, las condiciones de un laboratorio se consideran un ambiente controlado que no influye en forma determinante en los resultados experimentales que se registran.

Sin embargo, cuando un SFO es utilizado en condiciones reales, lo anterior puede dejar de ser válido. Un SFOD es sensible tanto a las variaciones mecánicas, como a los cambios de temperatura que se presenten. En campo, la medición de algún parámetro estructural, como lo es la deformación, ya no se lleva a cabo en condiciones isotérmicas y constantes a lo largo de la fibra óptica. Si la duración de la medición es muy corta, la consideración de la temperatura no es un factor importante. Sin embargo, en el caso de mediciones con cambios significativos de temperatura y con una duración considerable, la fluctuación de la temperatura es inevitable (Mohamad, 2012).

Por lo anterior, cuando se usan SFOD en pruebas de campo con cierta duración, es importante aplicar algún procedimiento para compensar los efectos de la temperatura en los datos que se obtienen.

7.3 Técnicas de compensación por temperatura en los SFOD

En el caso del sistema de monitorización OBR, como se mencionó en el capítulo 2, se utiliza la técnica de barrido de longitud de onda por interferometría (Samiec, 2012) para interrogar al SFOD conectado al sistema. De esta forma, los cambios físicos en el SFOD pueden ser medidos en forma general a través de los diferentes fenómenos de retro-dispersión que se presentan en el interior de la fibra óptica. En el caso específico del sistema OBR, esta medición se obtiene a través de la retro-dispersión de Rayleigh.

Estos cambios físicos en el SFOD son básicamente el incremento o la disminución de su longitud original, y la variación en su índice de refracción. Características que son intrínsecamente sensibles a parámetros ambientales como la temperatura, la deformación, y en menor medida a la presión y la humedad (LUNA, 2014).

En un SFOD la respuesta a la deformación se produce debido a la elongación del sensor, y al cambio en el índice de refracción de la fibra debido a efectos foto-elásticos. La respuesta térmica se produce debido a la expansión térmica inherente del material de la fibra y a la dependencia del índice de refracción con la temperatura (LUNA, 2014). Para tomar en cuenta estos dos efectos, la respuesta térmica de la fibra óptica se puede expresar a través de la ecuación 7.1

$$\Delta v_T = \Delta v_n + \Delta v_S \quad (7.1)$$

Donde Δv_n es el desplazamiento espectral del índice de refracción, y Δv_s es la constante de expansión térmica del material de la fibra.

De esta manera, para mediciones con el sistema OBR en condiciones en las que la temperatura ambiente es variable, el error debido a los efectos de temperatura puede ser controlado o compensado usando alguno de los métodos que se establecen a continuación.

7.3.1 Compensación por bucle de fibra óptica sin unir al sistema estructural

Para realizar la compensación por temperatura a través de este método, un segmento o bucle del SFOD se deja sin adherir a la superficie del sistema estructural a ser monitorizado. Lo anterior se muestra en forma esquemática en la Fig. 7.1

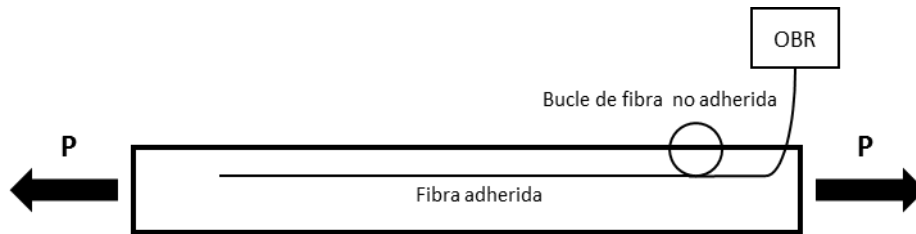


Fig. 7.1 Compensación por temperatura a través de un bucle de fibra óptica

Este segmento sin adherir, recibe el nombre de bucle de compensación y su respuesta térmica puede ser utilizada para compensar el efecto de la temperatura en las deformaciones mecánicas que se presentan en el SFOD adherido al sistema estructural en estudio. Este método es válido para casos en los que la variación de la temperatura a lo largo de todo el sistema estructural a monitorizar puede considerarse uniforme y no presenta gradientes importantes de temperatura en zonas específicas del sistema estructural monitorizado.

De esta manera, se establece la siguiente igualdad:

La deformación mecánica en el punto i de la fibra adherida, es igual a la deformación total medida en el punto i de la fibra adherida, y de la cual hay que sustraer los efectos térmicos que se producen en el bucle de fibra óptica sin adherir. Lo anterior, se puede expresar a través de la ecuación 7.2:

$$\epsilon_{Li} = (\Delta v_{Bi} * k_{\epsilon}) - ((k_{nT} * \Delta v_U * k_{\epsilon}) + (\Delta v_U * k_T * \alpha_S)) \quad (7.2)$$

Donde: Δv_B es desplazamiento espectral en la fibra adherida y Δv_U es el desplazamiento espectral en el bucle de fibra no adherido. A su vez:

$$k_{nT} = \frac{dn}{dt} \text{ effect}, 0.95$$

$k_\varepsilon = \text{factor de conversión de deformación}$

$k_T = \text{factor de conversión de temperatura}$

$\alpha_s = \text{Constante del sustrato}$

En la ecuación 7.2, el subíndice i indica puntos individuales a lo largo de la fibra óptica.

7.3.2 Compensación por temperatura punto a punto

Este método de compensación por temperatura, se utiliza en casos en los que existen gradientes de temperatura importantes a lo largo de toda la longitud del sistema estructural a monitorizar. En estas condiciones, un segmento de fibra sin adherir, y protegido en forma tubular, se coloca junto al segmento de fibra adherido a la superficie del sistema monitorizado. Lo anterior se muestra en forma esquemática, en la Fig. 7.2



Fig. 7.2 Compensación por temperatura a través de una fibra óptica aislada

Con base en lo anterior, la respuesta térmica del segmento sin adherir, se puede sustraer punto a punto de las deformaciones totales obtenidas del segmento de fibra adherido al sistema monitorizado.

De forma similar a la ecuación 7.2, se establece la siguiente igualdad:

La deformación mecánica en el punto i de la fibra adherida, es igual a la deformación total medida en el punto i de la fibra adherida, y de la cual hay que sustraer los efectos térmicos que se producen en el punto i del segmento de fibra óptica sin adherir. Lo anterior, se puede expresar a través de la ecuación 7.3:

$$\epsilon_{Li} = (\Delta v_{Bi} * k_{\epsilon}) - ((k_{nT} * \Delta v_{Ui} * k_{\epsilon}) + (\Delta v_{Ui} * k_T * \alpha_S)) \quad (7.3)$$

Donde: Δv_B es desplazamiento espectral en la fibra adherida y Δv_U es el desplazamiento espectral en el segmento de fibra no adherido. A su vez:

$$k_{nT} = \frac{dn}{dt} \text{ effect}, 0.95$$

$$k_{\epsilon} = \text{factor de conversión de deformación}$$

$$k_T = \text{factor de conversión de temperatura}$$

$$\alpha_S = \text{Constante del sustrato}$$

En la ecuación 7.3, el subíndice i indica puntos individuales a lo largo de la fibra óptica.

Los dos métodos descritos anteriormente, son solamente un ejemplo de una serie de propuestas que se han desarrollado para tener en cuenta los efectos de temperatura en casos en los cuales algún tipo de sistema de medición basado en SFOD es utilizado en la monitorización de estructuras reales, que están sujetas a importantes efectos de cambios de temperatura.

7.4 Descripción del puente y objetivo de la monitorización

El puente en estudio se encuentra ubicado en la entrada de la ciudad de Barcelona. Es un puente que consiste en dos vanos con una luz de aproximadamente 50 y 36 m respectivamente como se muestra esquemáticamente en la Fig. 7.3 y en la fotografía de la Fig. 7.4.

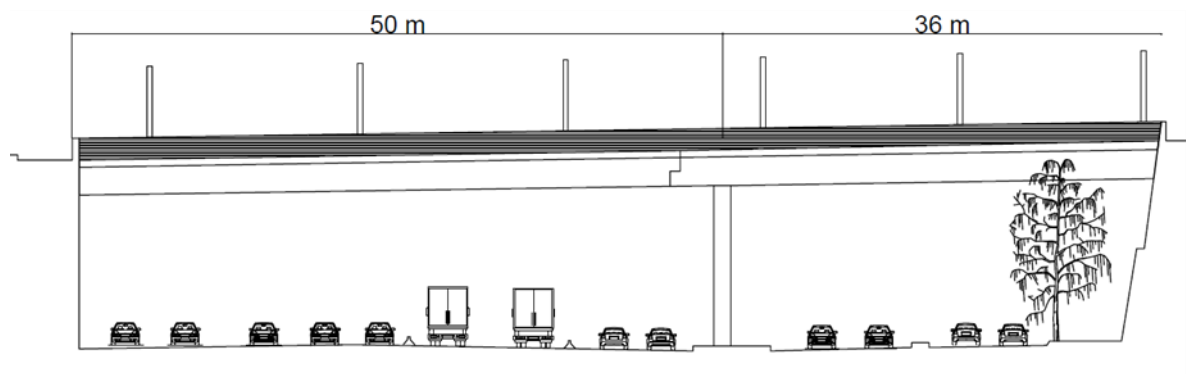


Fig. 7.3 Sección longitudinal del puente



Fig. 7.4 Vista general del puente monitorizado

A su vez, cada vano del puente consiste en una serie de tres vigas cajón de hormigón pretensado, que se encuentran conectadas en la parte superior por medio de una losa de hormigón armado. En la Fig 7.5 se muestra la distribución en planta de estas vigas. En la Fig. 7.6 se muestra las características de su sección transversal, y en la fotografía de la Fig. 7.7 se observa una vista de la parte inferior del puente, en la cual se aprecian las diferentes secciones cajón.

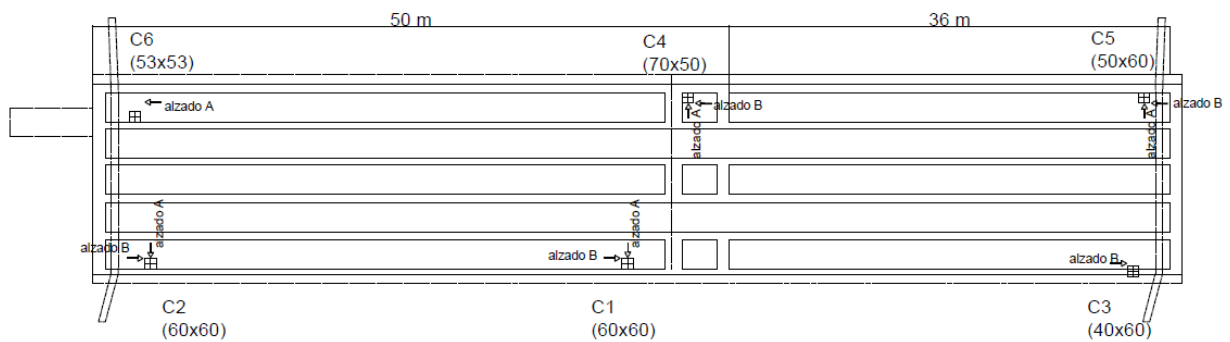


Fig. 7.5 Vista en planta y distribución de las vigas cajón del puente

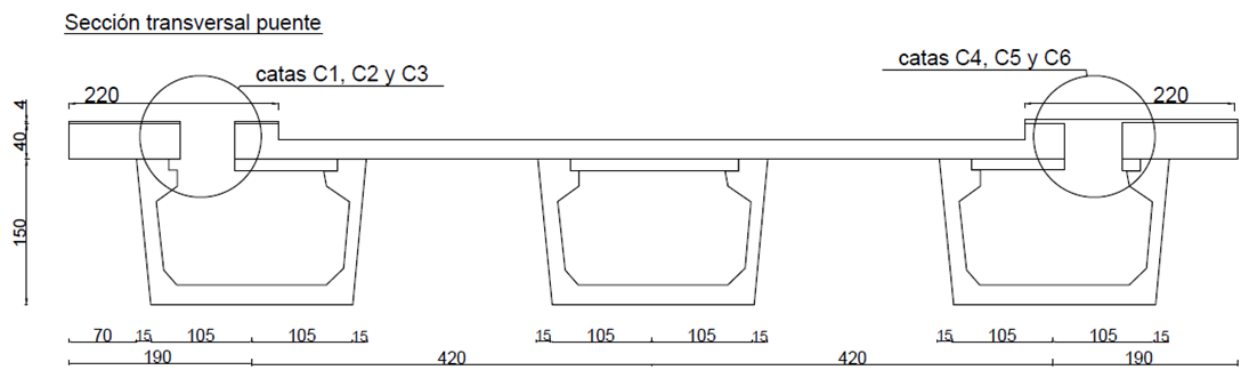


Fig. 7.6 Sección transversal de las vigas cajón del puente



Fig. 7.7 Vista de las vigas cajón que conforman los vanos de puente

Este puente permite el cruce de vehículos y peatones en ambos sentidos, y con el fin de mejorar el tránsito peatonal y su estética, se realizó un proceso de ampliación en sus dos extremos laterales. Se tenía previsto que dicha ampliación produjera un aumento en las cargas. Una de las características principales de este aumento de carga, era una distribución no uniforme en el sentido transversal del puente. La carga permanente era mayor en uno de los costados, por lo que se preveía que las flechas del puente aumentarían, y también, estuviera sujeto a un efecto de torsión, como se muestra en forma esquemática en la Fig. 7.8.

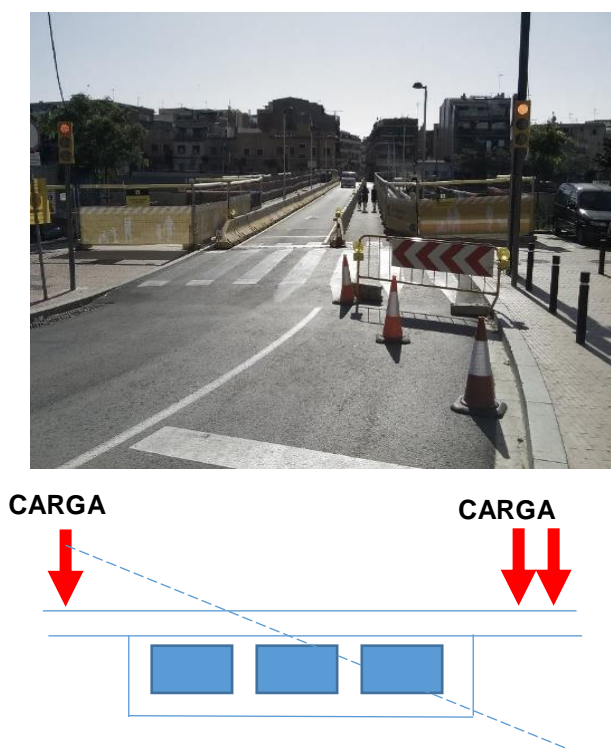


Fig. 7.8 Representación esquemática del aumento de carga permanente y el efecto de torsión.

Debido a lo anterior, se propuso llevar a cabo la monitorización del proceso de ampliación con el fin de poder detectar los principales cambios en el comportamiento estructural del puente, y obtener información que sirva para evaluar su seguridad estructural durante y al final de la ampliación.

7.5 Monitorización con SFOD

Para llevar a cabo la monitorización del puente durante todo el proceso de ampliación, se propuso la colocación de dos SFOD. En la selección de la posición de estos sensores, se consideró la posibilidad de obtener de la mejor manera posible, la evolución de la respuesta estructural a nivel de deformaciones. Para la colocación de los dos SFOD, se eligió el cajón más próximo al costado

del puente que según el proyecto de ampliación, tendrá la mayor carga permanente, y el cual, se muestra en planta en la Fig. 7.9, y en forma transversal en la Fig. 7.10.

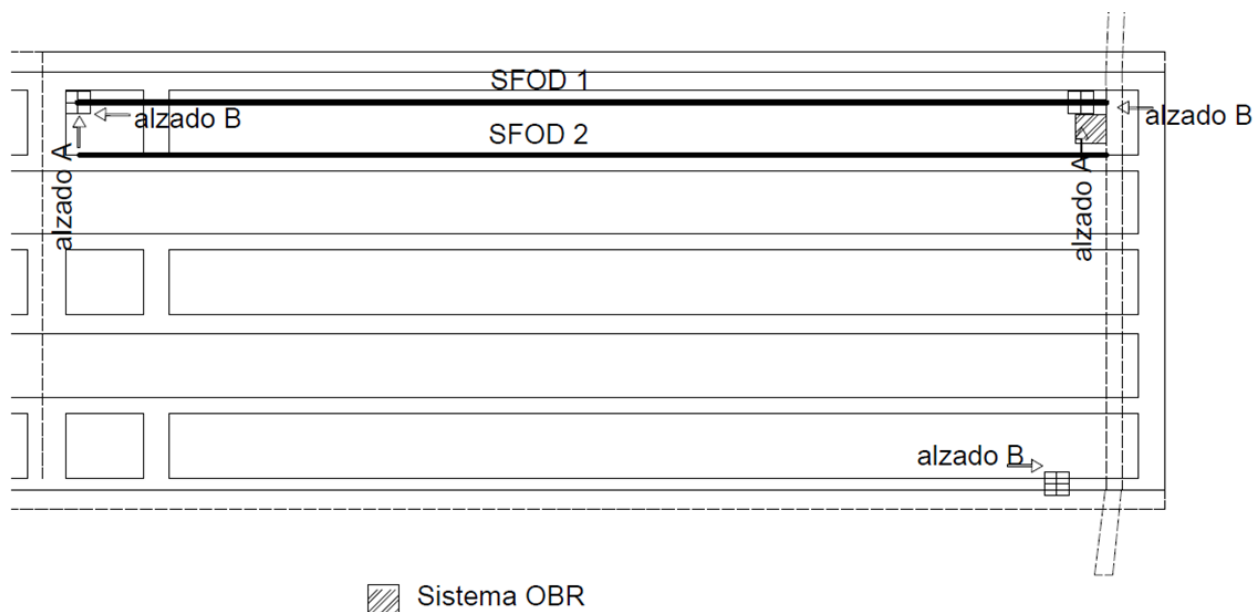


Fig. 7.9 Ubicación en planta de la posición de los dos SFOD en el puente.

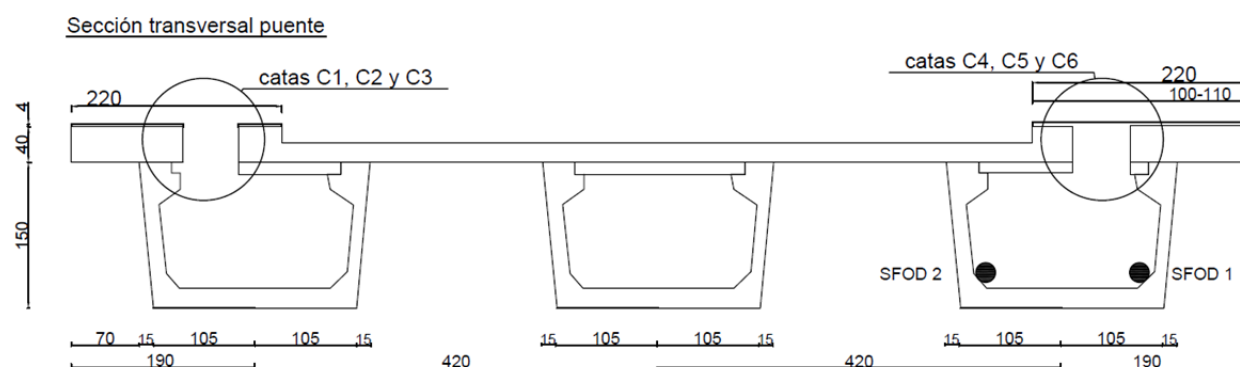


Fig. 7.10 Ubicación de los dos SFOD en sección transversal del puente.

Se puede observar en la Fig. 7.10, que se aprovechó la sección cajón, para instalar los SFOD en el interior del puente. Lo anterior, se decidió de manera estratégica con el fin principal de mantener los SFOD en un lugar protegido, y a su vez poder instalar y trabajar con el sistema OBR en forma temporal.

También, en las dos figuras anteriores, se identifican los sensores como SFOD1 y SFOD2. Ambos SFOD consistieron en cables de fibra óptica con las mismas características utilizadas en las

aplicaciones anteriores, pero con una longitud total de 50 m. De esta longitud, aproximadamente 36 m fueron adheridos a la superficie de hormigón para funcionar como SFOD. El resto de la fibra se mantuvo en un carrete y fue utilizado como bucle de compensación, para aplicar el método de compensación por temperatura correspondiente.

La instalación de dos SFOD se justificó debido a la fragilidad que presenta el tipo de fibra óptica que se utiliza en este tipo de sistema OBR. Al ser una fibra que carece de un recubrimiento de espesor considerable, su uso en estructuras reales debe de realizarse con una serie de cuidados extremos. La fibra una vez instalada puede llegar a dañarse, si esto sucede, las mediciones ya no podrán realizarse.

Por lo anterior, y tratándose de una monitorización temporal de larga duración, con la instalación de una segunda fibra se adquirió una redundancia que, en caso de utilizarse, ayudaría a no perder información.

7.6 Instalación de los SFOD y del sistema OBR

Los dos SFOD con diámetro de 0.2 mm fueron instalados en la parte inferior y a lo largo del cajón seleccionado, como se indicó en la Fig. 7.10. Previamente a la instalación, se limpió el tramo de superficie sobre la cual se pegó la fibra óptica. En la Fig. 7.11 se muestra dicho cajón, antes de la colocación de los sensores de FOD.



Fig. 7.11 Vista del cajón seleccionado a instrumentar previo a la instalación de los SFOD.



Fig. 7.12 Proceso de instalación de los SFOD

Posteriormente, en la parte baja y a cada lado del cajón, se montaron los dos SFOD de 50 m de longitud. En este proceso se extendieron los dos cables de fibra en la totalidad de la longitud a monitorizar, se fijaron a la superficie de hormigón en forma temporal con el uso de pequeñas etiquetas circulares. Posteriormente, el mismo adhesivo epoxi de las pruebas de laboratorio descritas en el capítulo seis, se utilizó para fijar en forma permanente la fibra óptica a lo largo de la superficie de hormigón.

Entre los principales aspectos a tener en cuenta esta su protección. Una forma de proteger la fibra, consistió en evitar adherirla a porciones de superficie de hormigón sumamente porosas o con una rugosidad que pudiera producir el rompimiento de la fibra durante su instalación y pegado. Al finalizar la instalación, estas partes de fibra no adheridas, se protegieron por medio de pequeños trozos de plástico y cinta adhesiva. En la Fig. 7.12 se muestra parte del proceso de instalación de la fibra. En la Fig. 7.13 se observan dos vistas generales de los dos SFOD instalados.



Fig. 7.13 SFOD instalados en la sección cajón del puente.

7.7 Proceso de monitorización temporal

Para la monitorización del puente, se utilizó el mismo sistema de medición OBR que en los ensayos de laboratorio de las vigas HPP descritos en el capítulo 5 de este trabajo. Cabe mencionar que las fechas de ambas aplicaciones coincidieron, pero gracias a las características y ventajas que ofrece el sistema OBR, debido a su ligereza, fácil instalación y operación, ambos estudios pudieron realizarse prácticamente en forma simultánea.

Durante los días de monitorización, los trabajos de ampliación se realizaron con el puente en servicio. Para llevar a cabo cada una de las etapas de monitorización temporal del puente, se establecieron lecturas en cada una de las fibras, con intervalos de captura cada 5 min y con una resolución espacial de 1 cm, lo que genera un volumen de información considerable. Estos intervalos de captura, se realizaron con el fin de no perder algún evento importante durante cada una de las etapas de medición.

En la Figura. 7.14 se aprecia del lado izquierdo, el carrete de fibra óptica que funcionó como bucle de compensación. En la parte derecha de la misma figura, se observa el sistema OBR instalado y en operación en el interior de la sección cajón del puente.

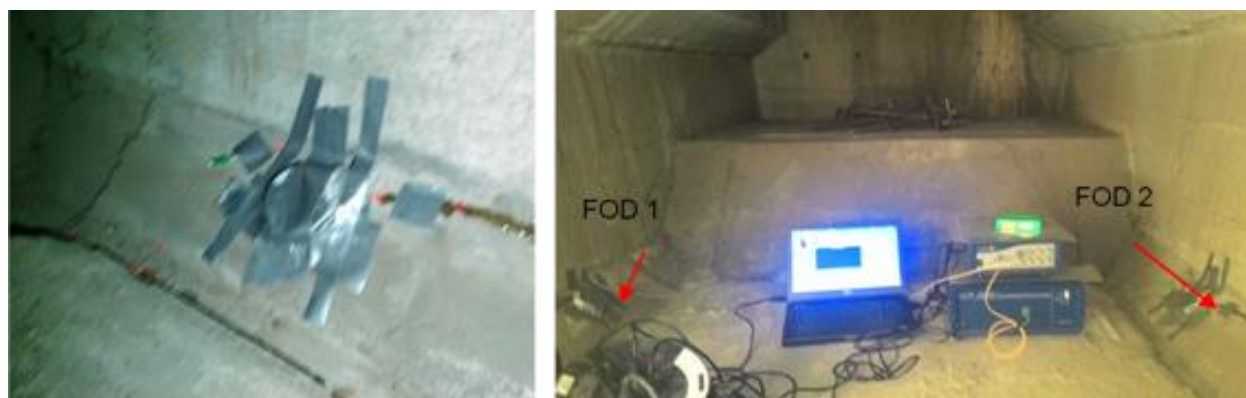


Fig. 7.14 Carrete de fibra óptica sin adherir a la estructura y sistema OBR en funcionamiento

7.8 Resultados

El principal objetivo de este proceso de monitorización fue la detección y localización de áreas del puente con incrementos significativos de esfuerzos y deformaciones, así como la posible aparición de fisuras.

Se analizaron los resultados obtenidos con los SFOD de 50 m de longitud, de los cuales aproximadamente 36 m estuvieron adheridos a la estructura, y los restantes 14 m se utilizaron para obtener la compensación por temperatura de las deformaciones obtenidas. Al realizar la captura de datos con una resolución espacial de 1 cm, se generaron para cada lectura 5000 puntos de análisis. De esta gran cantidad de información, se obtuvieron valores promedio de deformación, se seleccionaron valores críticos (máximos y mínimos) y se utilizaron para generar respuestas envolventes del sistema estructural.

En la Tabla 7.1, se resumen las diferentes etapas de monitorización temporal que se realizaron a lo largo de los casi ocho meses que duró la ampliación del puente.

La fecha del 29 de junio del 2015, corresponde al inicio de la monitorización del puente. En esta fecha y alrededor de las 13:15 h, se tomó la primera lectura en el SFOD1. Esta lectura se estableció como referencia o estado inicial del puente en el SFOD1. De manera similar, el día 6 de agosto de 2015 a las 10:40 h se tomó la primera lectura de referencia del SFOD2.

En la Tabla 7.1 se resumen las 14 etapas de monitorización temporal que se llevaron a cabo en el puente. Se puede distinguir su fecha de realización, la hora y la duración de cada una de estas etapas, y también se puede identificar con que sensor se midió en cada una de ellas. En este sentido cabe señalar, que actualmente el sistema OBR que se utilizó en ese trabajo, se encuentra configurado en su forma más sencilla de operación.

Lo anterior se traduce en la limitación de solamente poder llevar a cabo mediciones en un solo canal, por lo que la lectura secuencial de ambos SFOD no pudo ser posible. Por lo anterior, y para que las lecturas de cada etapa de monitorización fueran representativas del comportamiento del puente, se optó por alternar las mediciones con la selección de uno de los dos SFOD instalados en el puente.

Tabla 7.1 Resumen de las distintas etapas de monitorización temporal del puente

Fecha	Horario local	Sensor	Duración
29/06/2015	13:15 a 15:45	SFOD1	2 h y 30 min
16/07/2015	9:30 a 12:50	SFOD1	3 h y 20 min
06/08/2015	10:40 a 17:40	SFOD2	7 h
15/09/2015	10:40 a 17:40	SFOD1	7 h
01/10/2015	9:45 a 14:45	SFOD2	5 h
02/10/2015	9:05 a 10:36	SFOD2*	1 h y 30 min
09/10/2015	9:30 a 15:00	SFOD1	5 h y 30 min
04/11/2015	13:30 a 17:30	SFOD1** y 2	4 h
10/12/2015	9:35 a 16:05	SFOD2	6 h y 30 min
22/12/2015	9:25 a 12:25	SFOD2	3 h
18/01/2016	11:20 a 17:00	SFOD2	5 h y 40 min
19/01/2016	9:00 a 11:30	SFOD2	2 h y 30 min
20/01/2016	9:45 a 12:45	SFOD2	3 h
18/02/2016	9:50 a 17:30	SFOD2	7 h y 40 min

* Corte de energía eléctrica

** Medición de un solo evento de 5 min con el SFOD1

También en la Tabla 7.1, se observa que entre las mediciones del 29 de junio y del 4 de noviembre de 2015, las etapas de monitorización temporal, se realizaron con los SFOD 1 y 2 de forma alternada. Sin embargo, a partir del 10 de diciembre de 2015 y hasta la fecha de la última medición realizada el 18 de febrero de 2016, las mediciones se realizaron únicamente con el SFOD2. Lo anterior, debido a que el SFOD1 presentó problemas, y no pudo volver a obtenerse información en este sensor. Posterior al falló del SFOD1, se realizó una inspección de toda la zona instrumentada. Durante esta inspección se encontró que debido a los trabajos de ampliación, se tuvo acceso a la zona instrumentada para apuntalar una pequeña zona. En las fotografías de la Fig. 7.15 se puede observar dicho apuntalamiento.



Fig. 7.15 Apuntalamiento posteriormente a la instalación y puesta en funcionamiento del SFOD1

En la fotografía de la parte derecha de la Fig. 7.15, se puede apreciar la cercanía con respecto al SFOD1 con la que se apuntaló esta zona. Tal vez, debido al desconocimiento de la presencia de la fibra óptica, en algún momento la fibra fue dañada y se produjo su rotura.

Debido a que se contaba con la redundancia del SFOD2, se pudo continuar con la monitorización del proceso de ampliación del puente, hasta que prácticamente estuvo concluido.

Respecto al análisis de la información obtenida, en la Fig. 7.16 se muestra la primera lectura realizada con el SFOD1, y a partir de ella, la evolución a cada hora, de las deformaciones a lo largo de 2 h y 30 min, que duró esa primera etapa de medición. En esta figura se pueden apreciar, las deformaciones obtenidas a lo largo de los 50 m de la fibra óptica. Aproximadamente, los primeros 14 m corresponden a la fibra no adherida, que se mantuvo en un carrete (Fig. 7.14). Los siguientes 36 m, corresponden a la parte de la fibra óptica que se utilizó como SFOD1. Así, en la Fig. 7.16 a partir de los 14 m, se puede apreciar en la evolución de estos registros de deformación, como los efectos de temperatura son importantes.

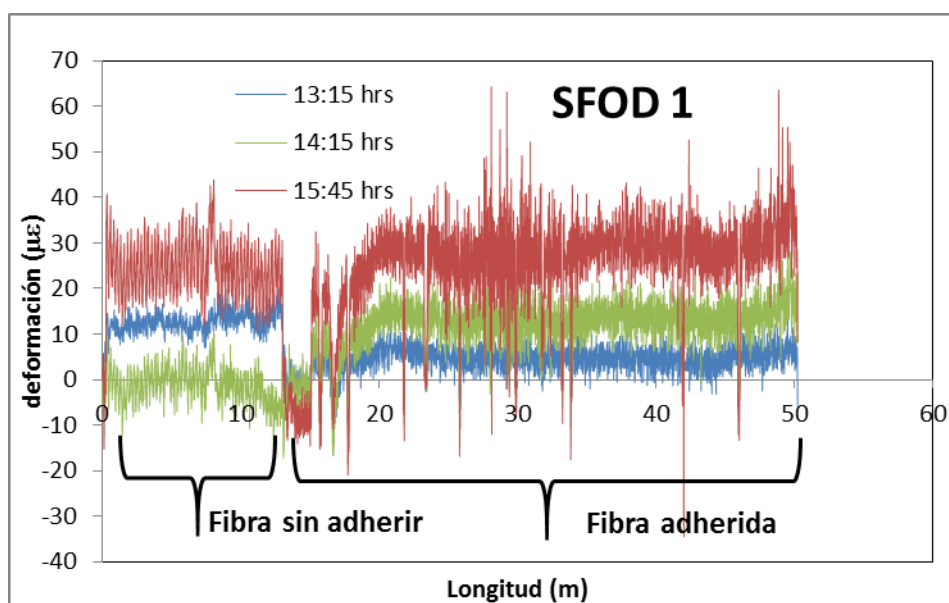


Fig. 7.16 Deformaciones en el SFOD1 durante el curso del día 26 de junio 2015

También en la Fig. 7.16, se puede apreciar como la primera lectura realizada a las 13:15 h, presenta un registro de deformación con valores muy cercanos a cero. Lo anterior es válido para ser considerado como un estado inicial del puente en estudio. En esta primera etapa y a partir de dicha lectura, los valores de deformación en las 2 h y 30 min de duración de esta primera etapa, aumentaron aproximadamente 20 $\mu\epsilon$ en tracción.

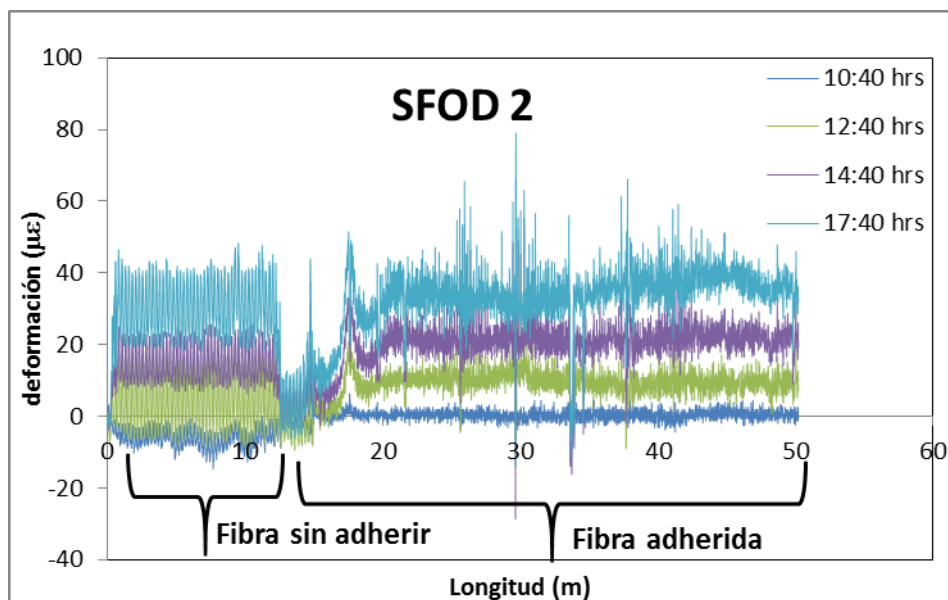


Fig. 7.17 Deformaciones a lo largo SFOD2 durante el curso del día 6 de agosto 2015.

En forma similar, en la Fig. 7.17 se muestra la etapa de monitorización del 6 de agosto 2015. Esta etapa correspondió a las primeras lecturas con el SFOD2.

En la Fig. 7.17, se muestra la lectura de referencia para el SFOD2. Dicha lectura fue realizada a las 10:40 h, y de igual manera que en la referencia del SFOD1, se aprecian valores de deformación muy bajos. A partir de haber establecido la referencia del SFOD2, se puede apreciar la evolución de las deformaciones a lo largo de las 7 h que duró esta etapa de monitorización. En la Fig. 7.17, al igual que en la primera etapa de monitorización con el SFOD1, se aprecia la influencia de los efectos de temperatura. En el caso del SFOD2, a partir de la primera lectura, las deformaciones variaron aproximadamente 32 $\mu\epsilon$ en tracción.

En las Figs. 7.16 y 7.17 se aprecian entre los 10 y 15 m de longitud, valores de deformación menores a los que en forma general se presentan en el resto de la longitud de los SFOD. Esta

disminución en las deformaciones, se presenta debido a la influencia que tiene el sistema de apoyo en la cinemática del puente.

En la Tabla 7.2, se muestran los valores de deformación promedio para ambos SFOD en cada una de las dos etapas descritas anteriormente. Estos valores fueron obtenidos de promediar cada 5 min, las deformaciones registradas en los dos SFOD, en una longitud que inicia a los 14 m de la fibra, y concluye en los últimos 50 m, que corresponde a la longitud adherida de la fibra a la estructura de hormigón. Lo anterior indica que los valores de la Tabla 7.2, corresponden a las deformaciones promedio en una longitud de aproximadamente 37 m de la viga instrumentada.

Tabla 7.2 Lecturas promedio en las primeras etapas de monitorización con los SFOD.

SFOD1		SFOD2	
29-jun-15		06-ago-15	
Hora	$\mu\epsilon$	Hora	$\mu\epsilon$
13:15	4.21	10:40	0.23
14:15	11.39	12:40	8.93
15:45	24.37	14:40	19.46
		17:40	32

A través del análisis de las variaciones de deformación que se presentan en la Tabla 7.2, es posible observar que al no existir cambios en las cargas del puente, la variación de las deformaciones se debe principalmente a los efectos de la temperatura. En estas variaciones de deformación durante ambas etapas de monitorización, es posible, a través de la aplicación de un método de compensación, distinguir en forma aproximada la influencia de la variación de la temperatura a lo largo del periodo de duración de cada una de estas dos etapas (Barrias, *et al.*, 2016).

Al tomar como referencia la primera lectura realizada, es posible observar la evolución de las deformaciones medidas con ambos SFOD durante las distintas etapas de monitorización. El periodo de monitorización comprendió casi ocho meses. En la Fig. 7.18 se puede observar la evolución de las deformaciones obtenidas en cada una de las etapas para el SFOD1. Cabe señalar que esta comparación se realizó tomando lecturas en días diferentes, pero procurando que la hora del día fuera similar, la cual fue entre las 12:30 y las 13:20 h.

Se puede apreciar un comportamiento a tracción del puente entre la primera etapa del 26 de junio y la segunda etapa de monitorización realizada el 16 de julio de 2015. Durante este periodo, el puente presentó una variación de carga poco significativa respecto a sus condiciones iniciales. La

carga aumento ligeramente, debido a la colocación de algunas barreras de hormigón y protecciones, como parte de los preparativos del inicio de la ampliación. En la fotografía de la Fig. 7. 19 se aprecia el aspecto que guardaba el puente durante esas fechas.

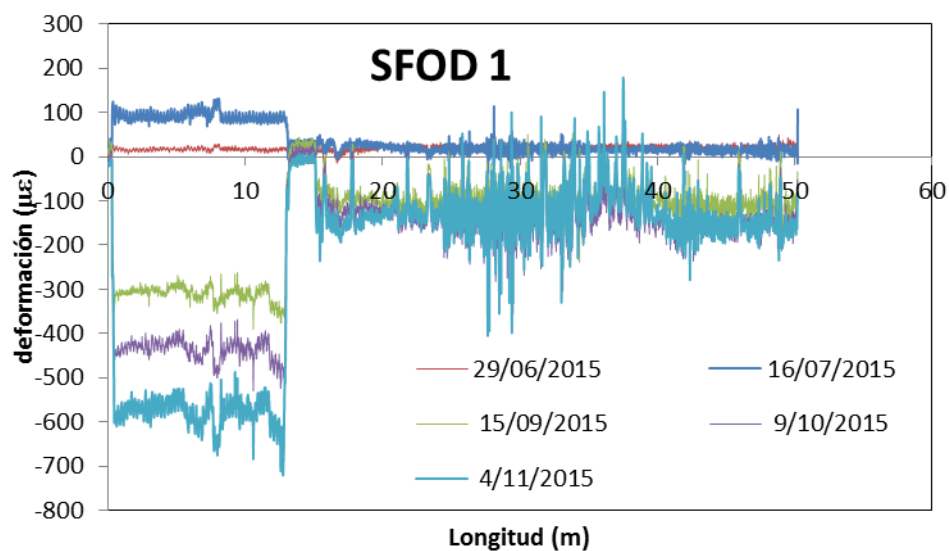


Fig. 7.18 Evolución de las deformaciones en el SFOD1 durante las distintas etapas de monitorización.



Fig. 7.19 Aspecto general del puente durante los meses de junio a julio de 2015.

A partir de la etapa de monitorización del 15 de septiembre de 2015, y hasta la última etapa de monitorización que se pudo llevar a cabo con el SFOD1, el puente presentó un comportamiento a nivel de deformaciones diferente a las dos primeras etapas de monitorización. En la Fig. 7.18 se puede observar como en el puente, a partir de la tercera etapa de monitorización, se manifestó un cambio en el sentido de las deformaciones de tracción a compresión.

Con respecto al SFOD2, del 6 de agosto fecha de la primera etapa de monitorización con este sensor, al 1 de octubre de 2015 en que se realizaron mediciones con el SFOD2 por segunda vez, también se presentó el cambio de tracción a compresión en las deformaciones obtenidas a través del sistema OBR. En la Fig. 7.20, se muestra la evolución de las deformaciones en el SFOD2 desde el inicio de la monitorización, hasta la fecha en la que prácticamente concluyeron los trabajos de ampliación del puente, en febrero de 2016

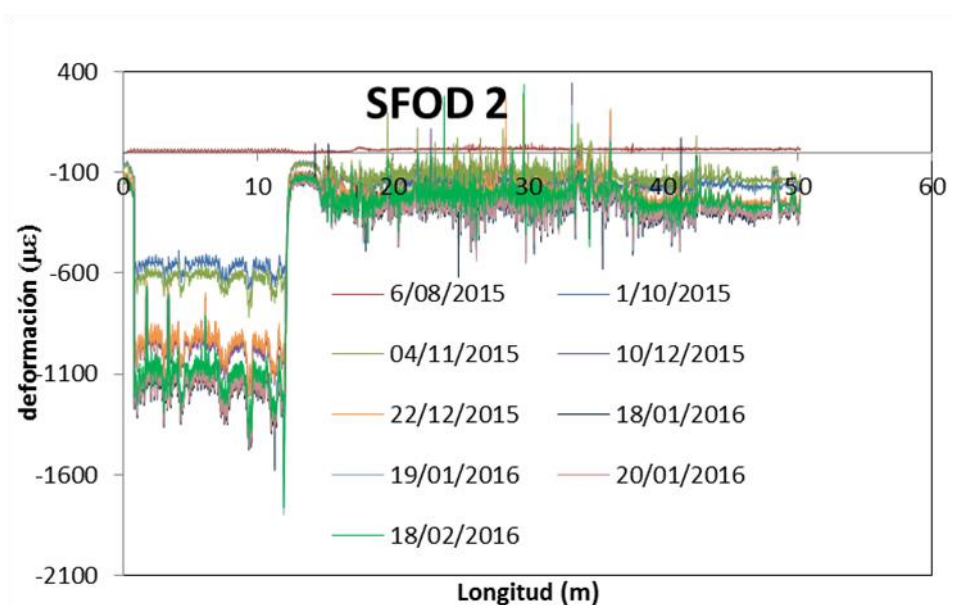


Fig. 7.20 Evolución de las deformaciones en el SFOD2 durante las distintas etapas de monitorización.

En la fotografía de la Fig. 7.21, se pueden observar algunos aspectos del estado en el cual se encontraba el puente durante el mes de agosto, periodo en el cual, se iniciaron las etapas de medición con el SFOD2.



Fig. 7.21 Vistas del aspecto del puente durante el mes de agosto 2015.

Es así como en ambos sensores, a partir del mes de septiembre, las etapas de monitorización presentaron un cambio de tracción a compresión en la parte inferior de la viga instrumentada. Dentro de los principales factores que influyeron en este cambio de deformaciones, se encuentran los siguientes:

- El efecto de la temperatura. La disminución de la temperatura entre el mes de julio, fecha de inicio de las etapas de monitorización, y el mes septiembre, resulta ser un factor muy significativo en dicho cambio.
- El efecto de los trabajos de ampliación del puente. En este periodo se presentó una descarga importante del puente, respecto a sus condiciones iniciales de acuerdo con los trabajos de ampliación previstos. En las fotografías de la Fig. 7.22, se puede observar una comparación entre las condiciones que sustentaba el puente el 26 de julio, y su modificación en septiembre de 2015.



26 de julio 2015



15 de septiembre 2015

Fig. 7.22 Comparación del estado de carga en el puente entre julio y septiembre de 2015.

En la Fig. 7.21 se puede observar claramente la disminución de carga en el puente, ocasionada principalmente por la remoción de la carpeta de asfalto, cuyo espesor era muy significativo.

Al tratarse de un periodo de monitorización desde junio de 2015 a febrero de 2016, se observaron importantes variaciones de temperatura. En este sentido, tanto el índice de refracción del haz de luz que se produce en la retro-dispersión dentro de los SFOD, como el material monitorizado, en este caso el hormigón, sufren efectos de expansión térmica que dependen de estos cambios de temperatura. Por lo tanto, los datos que se obtienen de cada etapa de la monitorización requieren de un proceso de compensación por temperatura.

Con relación a los métodos de compensación por temperatura descritos en las secciones 7.3.1 y 7.3.2, y por las condiciones en las que se ha realizado la monitorización temporal del puente, el método de compensación que se aplica en este caso es la compensación por bucle.

En este sentido, para obtener las deformaciones mecánicas, es necesario sustraer de los registros de deformación obtenidos en la fibra adherida a la superficie de hormigón, los efectos de la deformación aparente que producen la variación del índice de refracción, y la expansión térmica del material, en este caso del hormigón.

Así, se designan dos coeficientes, uno para tener en cuenta la Deformación Aparente del Índice de Refracción (DAIR), y un segundo para considerar la Deformación Aparente por Expansión Térmica del hormigón (DAET).

Los dos coeficientes DAIR y DAET definidos anteriormente, se pueden obtener al considerar la deformación unitaria de los primeros 14 m de la fibra. Esta parte de los SFOD 1 y 2, no estuvieron adheridos a la superficie de hormigón, como se puede ver en las Fig. 7.16 y 7.17. Así, se puede considerar que la deformación de estos tramos de la fibra, depende solamente de las variaciones de la temperatura y no está afectado por deformaciones mecánicas.

Para obtener los dos coeficientes mencionados, se parte de la ecuación 7.2, planteada en la sección 7.3.1 de este capítulo, y se busca determinar cada una de los términos del lado derecho de la igualdad.

$$\epsilon_{Li} = (\Delta v_{Bi} * k_{\epsilon}) - ((k_{nT} * \Delta v_U * k_{\epsilon}) + (\Delta v_U * k_T * \alpha_S)) \quad (7.2)$$

El primer término $\Delta v_{Bi} * k_{\epsilon}$, representa la deformación promedio medida en la fibra adherida. Esta deformación promedio, se puede obtener para cada una de las etapas de monitorización. En las Tablas 7.3 y 7.4 en la segunda columna de cada una de ellas, se muestran dichas deformaciones para los SFOD1 y 2 respectivamente.

Tabla 7.3 Deformaciones promedio y compensación por temperatura del SFOD1

SDOF1				
Fecha	$\mu\epsilon$ prom fibra adherida	$\mu\epsilon$ prom DAIR*	$\mu\epsilon$ prom DAET**	$\mu\epsilon$ prom deformación mecánica
29/06/2015	11	-1	1	11
16/07/2015	16	90	-114	40
15/09/2015	-89	-321	405	-173
09/10/2015	-136	-444	561	-253
04/11/2015	-153	-574	726	-304

* Deformación Aparente del Índice de Refracción

** Deformación Aparente por Expansión Térmica

Tabla 7.4 Deformaciones promedio y compensación por temperatura del SFOD2

SDOF2				
Fecha	$\mu\epsilon$ prom fibra adherida	$\mu\epsilon$ prom DAIR*	$\mu\epsilon$ prom DAET**	$\mu\epsilon$ prom deformación mecánica
06/08/2015	0.23	-6	8	-1.40
01/10/2015	-152	-568	718	-302
04/11/2015	-117	-630	796	-283
10/12/2015	-209	-976	1234	-467
22/12/2015	-202	-953	1205	-454
18/01/2016	-270	-1112	1406	-563
19/01/2016	-252	-1143	1445	-554
20/01/2016	-253	-1160	1466	-559
18/02/2016	-219	-1070	1356	-502

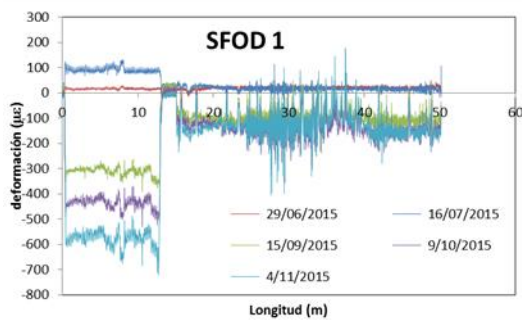
* Deformación Aparente del Índice de Refracción

** Deformación Aparente por Expansión Térmica

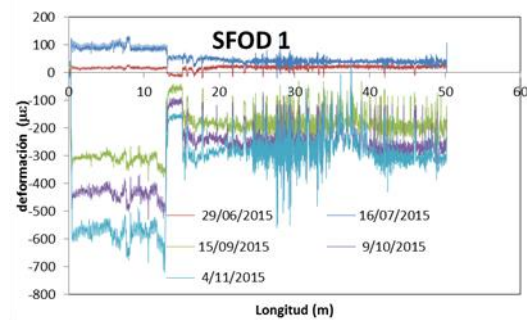
Para tener en cuenta el término $k_{nT} * \Delta v_U * k_\epsilon$ de la ecuación 7.2, que representa la variación que sufre el índice de refracción por efectos térmicos, se consideran los valores de $k_{nT} = 0.95$ y $k_\epsilon = -6.67 \mu\epsilon/GHz$ para ambas constantes. Posteriormente, se considera la deformación promedio en el tramo de fibra no adherido y se iguala con el término anterior. De esta manera se obtienen los valores de Δv_U que se muestran en la tercera columna también en las Tablas 7.3 y 7.4, y que se denominan DAIR.

Por último, para obtener el valor del término $\Delta v_U * k_T * \alpha_s$, el cual considera la variación térmica del sustrato al que está adherida la fibra, y que en este caso es una superficie de hormigón, se utilizan las constantes $\alpha_s = 10 * 10^{-6}$ y $k_T = -0.801$. En este término ya se conoce con anterioridad Δv_U por lo que basta multiplicarlo por las dos constantes anteriores, para obtener el que se denomina DAET, y el cual se muestra en la cuarta columna de las Tablas 7.3 y 7.4. En dichas tablas, en la última columna, se obtiene el resultado de la aplicación de la ecuación 7.2, obteniéndose así una compensación por temperatura basada en el método de bucle no adherido a la superficie, descrito en la sección 7.3.1 de este capítulo.

De esta forma, los resultados de las Fig. 7.18 y 7.19 se modifican por la compensación por temperatura y se observan en la Figs. 7.22 y 7.23.



a) Lecturas sin compensación



b) Lectura con compensación

Fig. 7.22 Lecturas del SFOD1 antes y después de la compensación por temperatura

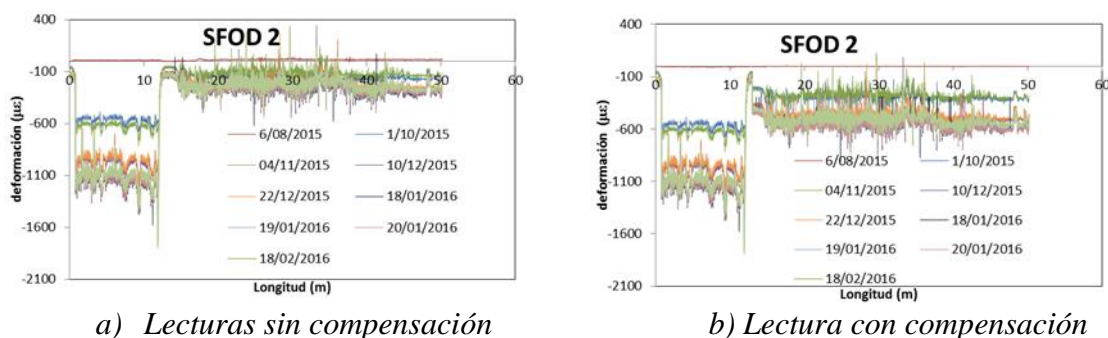


Fig. 7.23 Lecturas del SFOD2 antes y después de la compensación por temperatura

Cabe aclarar que en el proceso de compensación por temperatura realizado con el método de compensación por bucle, se utilizaron valores promedio de la deformación en toda la longitud instrumentada del puente, que fue de aproximadamente 36 m, así como también registros realizados a una hora similar del día durante las distintas etapas de medición.

Lo anterior limita los resultados obtenidos a una interpretación general del comportamiento del puente, sin poder detallar algún aspecto en particular de alguna de sus secciones.

Para poder llevar a cabo un estudio más detallado de los efectos de la temperatura en el comportamiento estructural del puente, se tendría que haber acondicionado la instrumentación con un SFOD de mayor longitud para realizar una instalación que permitiera tener un tramo de fibra óptica protegida y aislado de igual longitud a la adherida al hormigón, y poder realizar una compensación punto a punto.

Otro aspecto importante en este sentido, sería completar la instrumentación con al menos dos termómetros para medir la temperatura dentro y fuera de la estructura, así como con sensores que permitan conocer el grado de humedad, y poder añadir al estudio, el efecto de las condiciones ambientales bajo las cuales el puente ha sido monitorizado. Lo anterior no pudo realizarse debido a factores ajenos a este trabajo de investigación. Sin embargo, la experiencia de monitorización de una estructura en condiciones reales con un sistema OBR ,ayuda a mejorar el uso de esta relativamente nueva técnica de MSE.

7.9 Conclusiones

De estos resultados, se puede observar el efecto general de la disminución de la temperatura, así como de la descarga que sufrió el puente debido a la modificación de su peso propio al tomar como referencia la lectura de calibración del día 26 de junio de 2015. Esta modificación en las lecturas de deformación, acentúan aún más los efectos de compresión en la parte inferior del puente.

Respecto al análisis de los esfuerzos, debido a los niveles de deformación observados, se puede considerar un comportamiento elástico de las fibras del hormigón, en el cual los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones. Si se considera un módulo de deformación del hormigón E_c , y para la estructura un estado de servicio de $0.4 \cdot f_{cm}$ (o $0.5 \cdot f_{ck}$), es posible observar y concluir que, a pesar de la variación de las deformaciones longitudinales, durante los trabajos de ampliación del puente, no se han inducido esfuerzos excesivos.

Esta variación de los esfuerzos, es posible cuantificarla, si se aplican las ecuaciones constitutivas y el diagrama tensión-deformación del hormigón. Para el SFOD1, la mayor variación de deformación observada fue de $-304 \mu\epsilon$ que corresponde a un incremento de esfuerzos de 11.42 MPa. Con relación al SFOD2, la mayor variación observada fue de $-563 \mu\epsilon$, en enero de 2016, y es equivalente a 21.16 MPa. Cabe mencionar, que estas variaciones de esfuerzos siempre fueron analizadas respecto a las lecturas iniciales de calibración, realizadas el 26 de junio de 2015 para el SFOD1 y el 6 de agosto de 2016 para el SFOD2.

Como resultado, es posible concluir que estas variaciones de esfuerzo, no inducen cambios en el comportamiento estructural del puente, ya que son permisibles en este tipo de estructuras, teniendo en cuenta que estas variaciones ocurren en un estado de compresión del hormigón.

Con relación a los picos y algunas de las discontinuidades obtenidas por el sistema OBR, se pueden relacionar con la unión entre las vigas prefabricadas, en donde la fibra óptica presenta falta de adherencia con la superficie de hormigón, desde el inicio de su instalación. Estos picos, aunque presentan variaciones de magnitud importante, permanecen estables en términos de su localización. Estas variaciones, pueden ser consecuencia de vibraciones que se transmiten a los SFOD producidas por el tránsito de vehículos de la propia obra.

En este capítulo, se ha mostrado una aplicación del sistema OBR en la MSE de una estructura real. Durante este proceso de monitorización, el puente en estudio sufrió cambios físicos en su conformación, sin embargo, nunca dejó de prestar servicio. Las etapas de monitorización realizadas, siempre incluyeron el tránsito de peatones y vehículos.

Con la aplicación del sistema OBR, fue posible seguir y monitorizar el comportamiento estructural del puente, durante los distintos procesos constructivos que se realizaron desde el inicio, hasta casi el final de la conclusión de su ampliación.

Con las lecturas realizadas con los SFOD en diferentes fechas, fue posible detectar con facilidad los incrementos de esfuerzo producidos durante los trabajos de ampliación, y de esta forma evaluar el comportamiento estructural del puente.

La evolución de la variación de las deformaciones a lo largo de una determinada extensión de esta estructura se logró con relativa facilidad. Lo anterior consistió en la simple instalación de un sensor y una sola conexión a un sistema de lectura.

Sin embargo, existen algunas mejoras que pueden ser hechas con el fin de mejorar el funcionamiento del actual sistema OBR como herramienta de monitorización. Una de estas mejoras, es tener la posibilidad de obtener información de dos o más SFOD en forma cuasi-simultanea o secuencial. Por ejemplo, durante las diferentes etapas de monitorización del puente, la toma de lecturas solamente se pudo realizar en un solo SFOD. Si se tuviera la posibilidad de realizar lecturas secuenciales, se podrían evaluar los efectos de flexión y torsión en la sección transversal del puente.

Con relación a los efectos de temperatura, sin duda la medición de la variación de la temperatura, es necesaria con el fin de poder evaluar de una mejor manera dichos efectos. Aun así, los resultados obtenidos a través del sistema OBR, probaron su confiabilidad en aplicaciones de MSE en la ingeniería civil, y sobre todo, establecen un futuro prometedor en el uso de los sistemas de monitorización basados en SFOD.

CAPÍTULO 8

8.1 CONCLUSIONES FINALES

La motivación inicial de esta tesis doctoral fue dar continuidad y profundidad a las experiencias derivadas de las primeras aplicaciones del sistema de medición OBR como una herramienta complementaria o alternativa en la monitorización de estructuras de hormigón.

Para cubrir el objetivo anterior, este trabajo se ha dividido en cuatro partes. Una primera parte ha consistido en la recopilación de información referente a los sensores de fibra óptica (SFO) en general, con el fin de particularizar el funcionamiento y uso de los sensores de fibra óptica Distribuida (SFOD) en la monitorización de estructuras de hormigón.

Una segunda parte ha consistido en la explotación y optimización de la información experimental obtenida durante un estudio previo, en el cual una losa de hormigón armado fue ensayada a flexión e instrumentada simultáneamente en forma convencional y con un SFOD. En este caso, se ha elaborado un algoritmo para la obtención del ancho de fisura promedio a partir de la información proporcionada por el SFOD. Dicho algoritmo se ha verificado con resultados experimentales disponibles del ensayo en la losa de hormigón.

Una tercera parte en extender el uso del sistema de medición OBR con SFOD en estructuras de hormigón, a un problema estructural más complejo como es el comportamiento a cortante de vigas de hormigón. Para ello, se realizó una campaña experimental de laboratorio que consistió en el ensayo de tres vigas de Hormigón Parcialmente Pretensado (HPP). Cada una de estas tres vigas estuvo sujeta a esfuerzo cortante, y posteriormente una de estas vigas ya con la presencia de daño, fue sometida a un cuarto ensayo pero esta vez a flexión. En estos ensayos, cada viga fue instrumentada tanto con sensores tradicionales discretos como con SFOD. Como resultado de esta fase, se cuenta ahora con una metodología para la detección, localización y cuantificación de la fisuración para esfuerzo cortante a partir de las deformaciones medidas con un SFOD.

Finalmente, la cuarta parte de este trabajo ha consistido en el uso del mismo sistema de medición OBR, pero en la monitorización de una estructura de hormigón en condiciones reales. La estructura monitorizada es un puente urbano de hormigón pretensado sujeto a un proceso de ampliación para mejorar su funcionalidad y apariencia.

En relación a cada una de estas cuatro partes, se destacan las siguientes conclusiones.

1. En la primera parte del trabajo, se conformó un estado del arte a través del cual se destacaron los principios básicos de funcionamiento de los SFOD. Lo anterior resultó importante, ya que al tratarse de un tipo de sensores de aplicación relativamente reciente y de uso limitado respecto a los sensores tradicionales, su conocimiento y el entendimiento de su funcionamiento resulta fundamental para su correcta aplicación.

Posteriormente, al conformar el estado del arte se destacó la diversidad de aplicaciones y en forma particular el uso de los SFOD en la monitorización de estructuras de hormigón. Así, se pudo inferir su potencial con el fin de cubrir limitaciones que actualmente se tienen al usar sensores tradicionales de tipo discreto. Este estado del arte se ha recogido en una publicación (Rodríguez, *et al.*, 2015b)

2. En la segunda parte y con la información generada con el sistema de medición OBR en un estudio previo, se propuso un método de cálculo del ancho de fisura promedio para estructuras de hormigón sujetas básicamente a flexión. El método se basó en el uso de los registros continuos de deformación que se obtuvieron a través de un sistema de medición OBR, en una losa de hormigón ensayada en forma estática. La descripción y desarrollo de esta metodología se recogió en una publicación (Rodríguez, *et al.*, 2015a).

Los anchos de fisura promedios obtenidos con el método OBR para flexión tienen una buena correspondencia con los anchos de fisura que se obtuvieron por medio de una instrumentación convencional conformada por transductores de desplazamiento electromecánicos. En este sentido, y al estar limitada la información respecto a los anchos de fisura con la instrumentación convencional, se recurrió a la elaboración de un modelo simplificado en 2D no lineal de elementos finitos, para reproducir los patrones de fisuración que se presentaron en la losa más allá del centro del vano, única zona en la que se pudo disponer la instrumentación convencional. La comparación de los valores experimentales mediante SFOD y teóricos muestran también una buena concordancia. En la zona traccionada de la losa, se pudieron obtener tanto patrones de fisuración como su localización y el ancho de fisura correspondiente. De igual forma, en la zona de compresión de la losa, la distribución de la deformación experimental y teórica, muestran una muy buena correlación.

Todo ello, permite validar el método propuesto de monitorización de daño por fisuración de elementos de hormigón sometidos a flexión mediante SFOD.

Tal como se ha dicho, para confirmar y extender el método de cálculo de ancho de fisura promedio propuesto en este trabajo, se elaboró un modelo simplificado en 2D de la losa en estudio. Se realizaron una serie de análisis de tipo no lineal para calibrar una serie de modelos propuestos. De la comparación entre los resultados analíticos y experimentales, se pudo definir el modelo que se ajustaba mejor a la respuesta obtenida experimentalmente. Al tratarse de un caso de respuesta a flexión, el modelo que mejor se ajustó a la respuesta experimental fue un modelo en el cual la rotación de la fisuración estaba restringida. Así las fisuras detectadas, que eran prácticamente verticales y perpendiculares al eje longitudinal de la losa, pudieron ser detectadas, localizadas y cuantificadas de forma correcta.

3. Respecto a la detección y localización de fisuras en el caso de una sollicitación por esfuerzo cortante, el sistema OBR presentó un comportamiento aceptable. La detección en la aparición de fisuras con relación al nivel de carga en cada ensayo se pudo realizar con una buena precisión. Ello permitió la obtención de patrones de fisuración mediante el sistema OBR que se pudieron contrastar visualmente con la fisuración obtenida en los ensayos, siendo la correlación excelente. Sin embargo, el sistema OBR presentó limitaciones importantes en cuanto a la caracterización completa de la fisuración. En este sentido, la principal limitación fue el cálculo del ancho de fisura, el cual solamente se pudo obtener para deformaciones alrededor o ligeramente superiores a las $10,000 \mu\epsilon$, que para las vigas ensayadas correspondieron a niveles de carga no mayores a los 262 kN, durante la rama ascendente del primer ciclo de carga, para las tres vigas ensayadas. Sin embargo, para estos niveles de carga, el ancho de las fisuras ha sido del orden de 0.258 mm. En cada una de las vigas ensayadas, siendo, por tanto, un nivel de carga muy superior al habitual en una estructura en servicio. Se puede concluir, por tanto, que la técnica OBR es también utilizable en la obtención del ancho de fisura en la monitorización de estructuras de hormigón en servicio.

De manera preliminar, y a falta de un estudio más profundo de esta limitación para cargas cercanas a la rotura del elemento, se puede deducir que la fibra utilizada en este estudio, al ser sumamente sensible a las deformaciones, debido a que solo cuenta con una ligera capa de recubrimiento, puede presentar un comportamiento inestable cuando el ancho de fisura es muy grande (de un orden superior a 0.3 mm) y el daño en el hormigón también ya es considerable.

En relación con los resultados obtenidos en los ensayos de la viga I-1 en la cual se utilizaron tres distintos tipos de adhesivos, un epoxi, un cianoacrilato y adhesivo silano modificado. En términos de detección de fisuras los tres adhesivos permitieron que las fisuras fueran detectadas correctamente. Sin embargo debido a la complejidad de la fisuración por cortante, con los resultados obtenidos es difícil establecer de manera conclusiva la influencia de cada adhesivo en las lecturas de deformación obtenidas. Sin embargo y como se mencionó en el capítulo seis, con base en resultados de estudios previos, los adhesivos epoxi son la mejor opción en el caso de adherir SFOD a superficies de hormigón. Lo anterior debido a la eficiente adherencia entre la superficie de hormigón y los SFOD, la buena correspondencia en general entre las lecturas de deformación obtenidas con los SFOD y las galgas que sirvieron como referencia.

Una parte de los resultados de los ensayos correspondientes a esta tercera fase han sido presentados en una publicación (Rodríguez, *et al.*, 2016)

En un cuarto ensayo de laboratorio la viga I-3 previamente ensayada a cortante y con fisuras también a flexión, fue instrumentada en forma convencional y un SFOD con el fin de monitorizar su comportamiento a flexión.

En este ensayo, la viga en estudio ya presentaba daño en forma de fisuras en la zona donde se dispuso el SFOD, por lo que, desde los primeros registros la presencia de fisuras fue detectada. Durante este ensayo, solamente se pudo obtener información de la parte ascendente del primer ciclo de carga. El nivel de carga fue de aproximadamente de 295 kN.

También en este ensayo se pudo constatar la limitación que puede suponer para la medición OBR el estado de daño en el que se encuentre la superficie sobre la cual se va adherir un SFOD. En efecto, en este ensayo la presencia inicial de fisuras por flexión, produjo problemas en los datos obtenidos en las secciones del SFOD adheridas a la parte inferior de la viga. No así en las secciones en la zona de compresión, las cuales mostraron resultados excelentes.

4. Por último, se llevó a cabo durante aproximadamente ocho meses la monitorización de un puente de hormigón pretensado, sujeto a un proceso de ampliación. En este proceso se comprobó la facilidad de instalación y versatilidad de uso del sistema OBR, ya que fue utilizado simultáneamente en el puente monitorizado y en los ensayos de laboratorio descritos en este trabajo.

En términos prácticos, la instalación de los SFOD resulta sumamente rápida si es comparada con el tiempo que consume la instalación, cableado y configuración de los sistemas de adquisición de datos para los sensores de tipo discreto.

La monitorización temporal de este puente urbano a través de SFOD fue una referencia continua durante los trabajos de ampliación de dicha estructura. A través de su interpretación se pudo comprobar que el puente se mantuvo a niveles de esfuerzo aceptables, no sufrió ningún tipo de fisuración y fue un ejemplo de lo importante que es tener en cuenta los efectos de temperatura cuando los SFOD son utilizados en condiciones ambientales reales. Parte de los resultados obtenidos en la monitorización de esta estructura real han dado lugar a una publicación (Barrias, *et al.*, 2016b).

Como conclusión final, se puede decir que el trabajo llevado a cabo en esta tesis doctoral ha permitido obtener una metodología para la detección, localización y cuantificación de patrones de fisuración, tanto a cortante como a flexión, en estructuras de hormigón armado y pretensado a nivel de las cargas de servicio habituales.

8.2 Futuras líneas de investigación

Sin duda, tratándose de un trabajo pionero en la monitorización con SFOD de estructuras de hormigón, el uso del sistema de medición OBR como parte de un requiere de algunas mejoras en un futuro. En este sentido, el sistema OBR presenta limitaciones importantes. Dentro de estas limitaciones, destaca la restricción de su uso actual a un solo canal de lectura, lo que ha impedido la obtención de lecturas secuenciales para poder cubrir áreas de monitorización de mayor extensión, o la comparación simultánea, del comportamiento de una estructura monitorizada en dos zonas de interés.

La posibilidad de observar zonas de interés, durante las capturas de información, está limitada a su visualización en pantalla, pero en muchas ocasiones al cambiar algún parámetro de visualización, la captura de datos puede presentar problemas, por lo que es conveniente no intervenir en el funcionamiento del sistema OBR, durante las capturas de información. Lo anterior limita la obtención de información preliminar.

Actualmente el análisis de la información, se realiza una vez finalizado todo el proceso de monitorización. Lo anterior limita la aplicación del sistema OBR, como componente de un sistema de monitorización en el cual se requiera de una respuesta inmediata del estado que presente una estructura monitorizada.

Lo anterior sin duda requiere de automatizar el post-proceso de la información y toda la serie de cálculos y obtención de gráficos y tablas de resultados mediante el uso de herramientas

computacionales que permitan automatizar el análisis de la información y tener una respuesta rápida del estado de salud estructural que guarda una estructura.

Durante los ensayos se detectaron puntos que no necesariamente fueron parte de los patrones de fisuración trazados. Estos puntos pueden ser desde pequeñas fisuras que en niveles de carga superiores serán parte de la conformación de otras fisuras, desperfectos en el pegado de la fibra, presencia de pequeñas oquedades en la superficie de hormigón, y efectos causados por el alto nivel de deformación al que está sometida la fibra óptica durante este tipo de ensayos. Para aclarar los aspectos anteriores, convendrá realizar estudios de laboratorio más detallados al respecto, en los cuales se puedan simular en forma controlada las variantes más importantes que puedan influir en la obtención de información confiable por medio de los SDOF y el sistema OBR.

De manera análoga a lo que se hizo en el ensayo de flexión de la losa, sería interesante desarrollar un modelo teórico de elementos finitos con fisuración a cortante, para poder contrastar la información experimental obtenida con la teórica, en aquellos puntos o zonas en que no se dispone de información experimental con los sensores discretos tradicionales.

En el caso de que el sistema de monitorización quisiera emplearse en el seguimiento de estructuras en niveles de carga cercanos a la rotura, debería estudiarse por qué motivo se producen los problemas en la señal obtenida con el SFOD cuando se llega a un cierto nivel de carga y/o a un cierto ancho de fisura.

Por último, habría que profundizar en los algoritmos o criterios sobre el tamaño de malla que permitan el replanteo de la fisuración por cortante sin necesidad de apoyo en la inspección visual.

REFERENCIAS

- Ansari F. y Libo Y. (1998), "Mechanics of Bond and Interface Shear Transfer in Optical Fiber Sensors", *Journal of Engineering Mechanics*, **124**(4), 385-394.
- Bairán J., Santos D., Duarte N., Marí A y Celada U. (2014), "Control de la fisuración a cortante y flexión mediante pretensado parcial. Memorias del VI Congreso ACHE, Madrid, España.
- Bao T. F., Wang J. L. y Yao Y. (2010), "A fiber optic sensor for detecting and monitoring cracks in concrete structures", *Science China. Technological Sciences*, **53**(11), 3045-3050
- Bao X. y Chen L. (2012), "Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors", *Sensors* **12**, 8601-8639.
- Barnoski M.K. y Jensen S.M. (1976), "Fiber waveguides: A novel technique for investigating attenuation characteristics", *Applied Optics*. **15** (2), 2112-2115.
- Barrias A. Casas J.R. y Villaba S. (2106a), "A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications", *Sensors* **16** (748), 1-35
- Barrias A. Casas J.R., Villalba S. y Rodríguez G. (2016b) "Health monitoring of real structures by distributed optical fiber sensors", *Proceedings of 5th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering(IALCCE)*, Delft, Holanda.
- Bastianini F., Corradi M., Borri A. y Di Tomasso A. (2005a), "Retrofit and monitoring of an historical building using "Smart" CFRP with embedded fibre optic Brillouin sensors". *Construction and Building Materials* **19**, 525-535.
- Bastianini, F., Matta, F., Galati, N. y Nanni A. (2005b), "A Brillouin smart FRP material and strain data post processing software for structural health monitoring through laboratory testing and field application on a highway bridge", *Proc. SPIE*, **5765**, 600-611.
- Bastianiani, F., Rizzo, A., Galati, N., Deza, U. y Nanni A. (2005c), "Discontinuous Brillouin strain monitoring of small concrete bridges: comparison between near-to.-surface and smart FRP fiber installation techniques", *Proceedings of SPIE*, **5765**, 612-623.
- Bernini R., Minardo A., Ciaramella S., Minutolo V. y Zeni L. (2011), "Distributed Strain Measurement along a Concrete Beam via Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fibers", *International Journal of Geophysic.*, Article ID 710941:1-5.
- Billington D.P. (2013), "La Torre y el Puente: el nuevo arte de la ingeniería estructural". Cinter Divulgación Técnica.
- Billon A., Henault J.M., Quiertant M., Taillade F., Khadour A., Martin R.P. and Benzarti K. (2014), "Quantitative strain measurements with Distributed Fiber Optic Systems: Qualification of sensing cable bonded to the surface of a concrete structure", *Proceedings of 7th European Workshop on Structural Health Monitoring*. Nantes, Francia.
- Boyd R.W. (1992), *Nonlinear Optics*, Academic Press, USA.

- Caminero M. A., López-Pedroza M., Pinna C. y Soutis C. (2013), "Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation", *Composites B* **53**, 76-91.
- Casas J.R. y Cruz P. (2003) "Fiber optic sensors for bridge monitoring". *ASCE Journal of Bridge Engineering*. **8**, 362-373.
- Casas J.R., Villalba S. y Villalba V. (2014) "Management and safety of existing concrete structures via optical fiber distributed sensing". Chapter of the book "Maintenance and Safety of Aging Infrastructure". Dan M. Frangopol and Yiannis Tsompanakis, Editors. CRC Press. Taylor and Francis
- Celada, U. (2015), "Estudio teórico y experimental sobre el comportamiento en servicio y en rotura de elementos isostáticos de hormigón parcialmente pretensados sometidos a flexión y cortante". Universitat Politècnica de Catalunya. Investigación doctoral en proceso
- Delepine-Lesoille S., Merliot E y Gautier Y. (2008), "Optical fiber strain sensors for use in civil engineering: State-of-the-art, industrial applications and outlook". *BLPC no. 272*, 123-140.
- Duck G. y LeBlanc M. (2000), "Arbitrary strain transfer from a host to an embedded fiber-optic sensor", *Smart Materials and Structures*, **9**, 492-497.
- EHE-08 (2011), "Instrucción Española de Hormigón Estructural". Gobierno de España. Ministro de Fomento. Secretaría General Técnica.
- Enckell M., Glisic B., Myrvoll F. y Bergstrand B. (2011), "Evaluation of large-scale bridge strain, temperature and crack monitoring with distributed fibre optic sensors". *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **1**, 37-46.
- Fang Z., Chin K., Qu R. y Cai H. (2012), *Fundamentals of Optical Fiber Sensors*. Wiley, New York
- Feng X., Zhou J., Sun Ch., Zhang X. y Ansari F. (2013), "Theoretical and Experimental Investigations into Crack Detection with BOTDR-Distributed Fiber Optic Sensors", *Journal of Engineering Mechanics*, **139** (12), 1797-1807.
- Froggatt M. y Moore J. (1998a), "Distributed measurement of static strain in an optical fiber with multiple Bragg gratings at nominally equal wavelengths", *Appl. Opt.*, **37**(10), 1741-1746
- Froggatt M. y Moore J. (1998b), "High resolution strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter", *Applied Optics* **37**, 1735-1740.
- Gao J., Shi B., Zhang W. y Zhu H. (2006), "Monitoring the stress of the post-tensioning cable using fiber optic distributed strain sensor", *Measurement* **39**, 420-428.
- Galindez-Jamioy C.A. y López-Higuera J.M. (2012) "Brillouin Distributed Sensors: An Overview and Applications", *Journal of Sensors*, Hindawi Publishing Corporations. Article ID 204101, 17 pages.

- Glisic B. y Inaudi D. (2007), Fiber optic methods for structural health monitoring, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Glisic B. y Inaudi D. (2012), "Development of method for in-service crack detection based on distributed fiber optic sensors", Structural Health Monitoring, **11**(2), 161-171.
- Glisic B., Chen J. y Hubbell. (2011), "Streicker Bridge: A comparison between Bragg-grating long-gauge strain and temperature sensors and Brillouin scattering-based distributed strain and temperature sensors", Proceedings of SPIE, **7981**, 1-10.
- Glisic B., Hubbell D., Hoeg S. D. y Yao Y. (2013), "Damage detection and characterization using long-gauge and distributed fiber optic sensors", Optical Engineering, **52**(8), 1-12.
- Gifford D.K., Kreger S.T., Sang A. K., Froggatt M., Duncan R. G., Wolfe S. y Soller B. (2007), "Swept-wavelength Interferometric Interrogation of Fiber Rayleigh Scatter for Distributed Sensing Applications", Proceedings of SPIE **6770**, 1-10.
- Gifford D.K., Sang A.K., Kreger S.T. y Froggatt M. (2010), "Strain measurements of a fiber loop rosette using high spatial resolution Rayleigh scatter distributing sensing",
- Henault J.M., Salin J., Moreau G., Quiertant M., Taillade F., Benzarti K., y Delepine-Lesoille S. (2012), "Analysis of the strain transfer mechanism between a truly distributed optical fiber sensor and surrounding medium", Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III, 733-739.
- Her S.Ch. y Huang Ch. Y. (2011), "Effect of Coating on the Strain Transfer of Optical Fiber Sensors", Sensors, **11**, 6926-6941. Proceedings of SPIE **7653**, 1-10.
- Hetch J. (2006), Understanding Fiber Optics. Prentice Hall, Fifth Edition. USA.
- Hoepffner R. (2008), "Distributed Fiber Optic Strain Sensing in Hydraulic Concrete and Earth Structures. Measuring Theory and Field Investigations on Dams and Landslides", Ph D Dissertation, Technische Universität München, München.
- Horiguchi T., Kurashima T. y Tateda M. (1989), "Tensile Strain Dependence of Brillouin Frequency Shift in Silica Optical Fibers", IEEE Photonics Technology Letters, **1**(5), 107-108.
- Horiguchi T., Shimizu K., Kurashima T., Tateda M. y Koyamada Y. (1995), "Development of a Distributed Sensing Technique Using Brillouin Scattering", Journal of Lightwave Technology, **13**(7), 1296-1302.
- Horiguchi T., Shimizu K., Kurashima T., Tateda M. y Koyamada Y. (1983), "Brillouin optical time-domain reflectometry", IEICE Trans. Commun, E67-B, **4**, 382-390.
- Hotate K. y Ong S.S.L. (2002), "Distributed fiber Brillouin strain sensing by correlation-based, continuous wave technique, cm order spatial resolution and dynamic strain measurement", Proc. of SPIE, Photonics Asia, 299-310.
- Hoult N.A., Ekim O. y Regier R. (2014) "Damage/Deterioration for Steel Structures Using Distributed Fiber Optic Stress Sensors", ASCE Journal of Engineering Mechanics, October, 1-9

- Imai, M., Nakano, R., Kono, T., Ichinomiya, T., Miura, S. y Mure, M. (2010), "Crack Detection application for Fiber Reinforced concrete Using BOCDA-Based Optical Fiber Strain Sensor", ASCE, Journal of Structural engineering, **136**(8), 1001-1008.
- Imai M. y Feng M. (2012), "Sensing optical fiber installation study for crack identification using a stimulated Brillouin-based strain sensor", Structural Health Monitoring, **11**(5), 501-509.
- Imai M. y Suzuki H. (2011), "Highly dense strain measurement of concrete retrofitted with smart fabric", Proceedings of SPIE, **7983**, 1-15.
- Inaudi D. y Glisic B. (2005), "Application of distributed Fiber Optic Sensory for SHM", Proceedings of 2nd SHMII Conference, Shenzhen, China, November.
- Iten M. (2011), "Novel Applications of Distributed Fiber-Optic sensing in Geotechnical Engineering". Proceedings of ETH, Zurich, Switzerland.
- Jahanshani M.R, Masri S. F. y Sukhatme S. (2011), "Multi-image stitching and scene reconstruction for evaluating defect evolution in structures. Structural Health Monitoring International Journal. **10**, 643-657.
- Klar A., Goldfeld Y. y Charas Z. (2010), "Measures for identifying cracks within reinforced concrete beams using BOTDR", Proceedings of SPIE , **7647**, 1-9.
- Krebber K., Lenke P., Liehr S., Schukar M., Wendt M y Witt J. (2010), "Distributed POF Sensors: Recent Progress and New Challenges". Invited Paper, International Conference of Plastic Optical Fiber (ICPOF), Yokohama, Japan.
- Kurashima T., Horiguchi T. y Tateda M. (1990), "Thermal effects on Brillouin frequency shift in jacketed optical silica fibers", Applied Optics, **29**(15), 2219-2222.
- Kurashima T., Tateda M., Horiguchi T. y Koyamada Y. (1997), "Performance Improvement of a Combined OTDR for Distributed Strain and Loss Measurement by Randomizing the Reference Light Polarization State", IEEE Photonics Technology Letters, **9**(3), 360-362.
- Lally E.M., Reaves M., Horell E., Klute S. y Frogatt M. (2012), "Fiber optic shape sensing for monitoring of flexible structures", Proceedings of SPIE, **8345**, 1-10.
- Lan Ch., Zhou Z. y Ou J. (2014), "Monitoring of structural prestress loss in RC beams by inner distributed Brillouin and fiber Bragg grating sensors on a single optical fiber", Structural Control and Health Monitoring, **21**, 317-330.
- Leung Ch. K. L., Elvin N., Olson N., Morse T.F. y He Y. F. (2000), "A novel distributed optical crack sensor for concrete structures", Engineering Fracture Mechanics, **65**, 133-148.
- Leung Ch. K. Y., Olson N., Wan K. T. y Meng A. (2005), "Theoretical Modeling of Signal Loss versus Crack Opening for a Novel Crack Sensor", Journal of Engineering Mechanics, **131**(8), 777-790.
- Li Q., Li G. y Wang G. (2003) "Effect of plastic coating on strain measurement of concrete by fiber optic sensor", Measurement, **34**, 215-227.

- Liu H. W., Chen J., Sun M. y Ding R. (2011), “Theoretical analysis and experimental of micromechanics and mechanics-optics coupling of distributed optic-fiber crack sensing”, *Science China. Technological Sciences*, **54 Suppl 1**, 185-191.
- LUNA. Engineering Note (2014), “Distributed Fiber Optic Sensing: Temperature Compensation of Strain Measurement.
- Minardo A., Bernini R., Amato L y Zeni L. (2012a), “Bridge Monitoring Using Brillouin Fiber-Optic Sensors”, *IEEE Sensors Journal*, **12**(1), 145-150.
- Minardo A, Persichetti G, Testa G y Zeni L. (2012b), “Long term structural health monitoring by Brillouin fibre-optic sensing: a real case”, *Journal of Geophysics and Engineering*, **9**, S64-S68.
- Mohamad H. (2012), “Temperature and strain sensing techniques using Brillouin Optical Time Domain Reflectometry”, *Proceedings of SPIE* Vol. 8346
- Mufti A., Thompson D., Inaudi D., Vogel H.M. y McMahon D. (2011), “Crack detection of steel girders using Brillouin optical time domain analysis”, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **1**, 61-68.
- Murià-Vila D., Camargo J., Aldama B. D., Rodríguez G., Aguilar L. A. y Ayala M, (2013) “Structural Health Monitoring of an Instrumented Building in Mexico City with Accelerometers and GPS Sensors”, *Proceedings of 6th International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, Honk Kong, December.
- Niklès M., Thévenaz L. y Robert A. (1997), “Brillouin Gain Spectrum Characterization in Single-Mode Optical Fibers”, *Journal of Lightwave Technology*, **15**(10), 1842-1851.
- Notas 7th SHMII-Short-Course (2015) “Optical Fiber Sensing and Geotechnical Health Monitoring”, 30 junio, Torino Italia.
- Palmieri L. y Schenato L. (2013), “Distributed Optical Fiber Sensing Based on Rayleigh Scattering”, *The Open Optics Journal*, **7**, (Suppl-1, M7), 104-127.
- Pakzad S., Kim S., Fenves G. L., Glaser S. D., Culler D. E. y Demmel J.W. (2005), “Multi-Purpose Wireless Accelerometers for Civil Infrastructure Monitoring”, *IWSHM*, Stanford.
- Ohno H., Naruse H., Kihara M. y Shimada A. (2001), “Industrial Applications of the OBTR Optical Fiber Strain Sensor”, *Proceedings of Optical Fiber Technology 7*, Invited Paper, 45-64.
- Olson N., Leung Ch. K. L., y Meng A. (2005), “Crack sensing with a multimode fiber: experimental and theoretical studies”, *Sensors and Actuators*, **A 118**, 268-277.
- Parker T. R., Farhadiroushan M., Handerek V. y Rogers A. (1997), “A fully distributed simultaneous strain and temperature Sensor using Spontaneous Brillouin Backscattering”, *IEEE Photonics Technology Letters*, **9** (7), 979-981.
- Rajeev P., Kodikara J., Chiu W.K. y Kuen T. (2013), “Distributed Optical Fiber Sensors and their applications in pipelines monitoring”, *Key Engineering Materials*, **558**, 424-434.

- Ravet F., Brifford F., Glisic B., Niklès M. y Inaudi D. (2009), "Submillimeter Crack Detection with Brillouin-Based Fiber-Optic Sensors", *IEEE Sensors Journal*, **9**(11), 1391-1396.
- Regier R. (2013). "Application of fiber optics on reinforced concrete structures to develop a structural health monitoring technique. Master thesis, Queen's Univ., Kingston, ON, Canada.
- Regier R. y Hoult N. A. (2014), "Distributed Strain Behavior of a Reinforced Concrete Bridge: Case Study", *Journal of Bridge Engineering ASCE*, (9) 1-9.
- Rodríguez G., Casas J.R. y Villalba S. (2014), "Assessing cracking characteristics of concrete structures by distributed optical fiber and non-linear finite element modelling", *Proceedings of 7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Nantes, France, July.
- Rodríguez G., Casas J.R. y Villalba S. (2015a), "Cracking assessment in concrete structures by distributed optical fiber", *Smart Materials and Structures*, **24**, 1-11.
- Rodríguez G., Casas J.R. y Villalba S. (2015b), "SHM by DOFS in civil engineering: a review", *Structural Monitoring and Maintenance*, **2** (4), 1-26
- Rodríguez G., Casas J.R., Villalba S. y Barrias A. (2016) "Monitoring of shear cracking in partially prestressed concrete beams by distributed optical fiber sensors", *Proceedings of 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, Iguazu, Brazil, June
- Rogers A. (1999), "Distributed optical-fibre sensing", *Meas. Sci. Technol*, **10**, R75-R99.
- Rossi P. y LaMaou F. (1989), "New method for detecting cracks in concrete using fiber optics", *Materials and Structures, RILEM*, Paris, **22**(132), 437-442.
- Rouchier S., Foray G., Godin N., Woloszyn M. y Roux J. J. (2013), "Damage monitoring in fibre reinforced mortar by combined digital image correlation and acoustic emission", *Construction and Building Materials*, **38**, 371-380.
- Samiec D. (2012), "Distributed fibre-optic temperature and strain measurement with extremely high spatial resolution", *Photonik International*, **1**, 10-13.
- Shen S., Wu Z., Yang C., Wan Ch., Tang Y. y Wu G. (2010), "An Improved Conjugated Beam Method for Deformation Monitoring with Distributed Sensitive Fiber Optic Sensor", *Structural Health Monitoring*, **9**(4), 361-378.
- Shi B., Sui H., Liu J. y Zhang D. (2006), "The BOTDR-based distributed monitoring system for slope engineering". *IAEG2006*, paper 63.
- Sigurdardottir D. H. y Glisic B. (2014), "On-site validation of fiber-optic methods for structural health monitoring: Streiker Bridge", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **5**, 529-549
- Soller B., Froggatt D., Gifford K. y Wolfe M.S. (2006), "Measurement of Localized Heating in Fiber Optic Components with Millimetric Spatial Resolution", *Proceedings of Optical Society of America Conference*, Cancun, Mexico, October.

Stoerzel J., y Randal N. (2015) "Monitoring shear induced degradation of reinforced and pretensions concrete members". IABSE Conference. Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges. Geneva, Suiza.

Thévenaz L. (2010), "Brillouin distributed time-domain sensing in optic fibers: state of the art and perspectives", Optoelectronics. China, 1-9.

Thévenaz L., Facchini M., Fellay A., Robert Ph., Inaudi D. y Dardel B. (1999), "Monitoring of large structures using distributed Brillouin fiber sensing", Optical Fiber Sensors OFS 13 Conference, 345-348.

Tianguo T., Xinsheng X. y Haowu L. (2011), "Health monitoring of civil infrastructure systems using distributed optical fiber sensors", Publicado por Sichuan University, Chengdu, China. School of Architecture and Environment and School of Water Resource and Hydropower.

Torres Górriz B. (2012), "Definición de las pautas y condiciones de monitorización, encapsulado y fijación de sensores de fibra óptica para la medida de deformación y temperatura de estructuras", Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Valencia, UPV, Valencia.

Villalba S. (2010), "Diseño y validación experimental de uniones mediante superposición de lazos de armaduras en viaductos de hormigón de sección transversal evolutiva. Optimización del proceso constructivo", Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, Barcelona.

Villalba S. y Casas J.R. (2011), "Monitorización y salud estructural. Aplicación de la fibra óptica distribuida (OBR) en estructuras de hormigón", V Congreso de Puentes y Estructuras ACHE, Barcelona Spain, October.

Villalba V., Casas J.R. y Villalba S. (2012), "Application of OBR fiber optic technology in structural health monitoring of Can Fatjó Viaduct (Cerdanyola de Vallés-Spain)", Proceedings of VI International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 12, Stresa, Italy, July.

Villalba S. y Casas J.R. (2013), "Application of optical fiber distributed sensing to health monitoring of concrete structures", Mechanical Systems and Signal Processing, **39**, 441-451.

Villalba, S. y Casas J.R. (2016) "New structural joint by rebar looping applied to staged box girder bridge construction. Static tests". Structural Concrete, **17** (5), 824-935. DOI: 10.1002/suco.201500117

Voss K. F. y Wanser K. H. (1994), "Fiber Sensors for Monitoring Structural Strain and Cracks", Second European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow.

Wan K.T., Leung Ch. K.Y. y Olson N. G. (2008), "Investigation of strain transfer for surface-attached optical fiber strain sensors", Smart Materials and Structures, **17**, 1-12.

Wan K. T. y Leung Ch. K. Y. (2007), "Fiber optic sensor for the monitoring of mixed mode cracks in structures", Sensors and Actuators, A 135, 370-380.

Yu F.T.S y Yin S. (2012), Fiber Optic Sensors. Marcel Decker, Inc.

- Zako M., Uragaki H. y Kodate K. (1995), “On intelligent structures using optical fiber (crack sensing using optical fiber)”. J. JSMS, **44**(499), 493-497.
- Zhang B., Zhou Z., Zhang K., Yang G. y Xu Z. (2006), “Sensitive skin and relative sensing system for real-time surface monitoring of crack in civil infrastructure”, Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, **17**, 907-917.
- Zhang B., Wang S., Li X., Zhou Z., Zhang X., Yang G. y Qiu M. (2013) “Online Bridge Crack Monitoring with Smart Film”, The Scientific World Journal, Article ID 303656, 1-14.
- Zhang B., Wang S., Li X., Zhang X., Yang G. y Qiu M. (2014) “Crack width monitoring of concrete structures based on smart film”, Smart Materials and Structures, **23**, 1-15.
- Zhang H. y Wu Z. (2008), “Performance Evaluation of BOTDR-based Distributed Fiber Optic Sensors for Crack Monitoring”, Structural Health Monitoring, **7**(2), 143-155.
- Zhou Z., He J. y Ou J. (2012), “Integrated Optical Fiber Sensing System by Combining Large-Scale Distributed BOTDA/R and Localized FBGs”, International Journal of Distributed Sensor Networks. Article ID 804394, 1-18.
- Zhou Z., Zhang B., Xia K., Li X., Yang G. y Zhang K. (2011), “Smart film for crack monitoring of concrete bridges”, Structural Health Monitoring International Journal, **10**, 275-289.
- Zou L. y Feng M. Q. (2008), “Detection of micrometer crack by Brillouin-scattering-based distributed strain and temperature sensor”, Proceedings of SPIE , **7004**, 1-4.

ANEXO A

Tabla A.1 Puntos de fisuración y nivel de carga Q en las Secciones del SFOD1 de la viga I-1

Sección	Punto	X (m)	Y (m)	Q (kN)
A	A1	1.89	0.36	173
	A2	1.195	0.36	200
	A3	1.215	0.36	200
	A4	1.28	0.36	216
	A5	1.82	0.36	216
G	G1	1.83	0.29	105
	G2	1.44	0.29	124
	G3	1.67	0.29	137
	G4	1.26	0.29	148
	G5	1.01	0.29	148
	G6	1.15	0.29	216
B	B1	1.82	0.28	103
	B2	1.43	0.28	122
	B3	0.99	0.28	145
	B4	1.65	0.28	146
	B5	1.24	0.28	147
	B6	1.09	0.28	157
	B7	1.12	0.28	216
	B8	0.9	0.28	236
F	F1	1.79	0.21	82
	F2	1.62	0.21	103
	F3	1.37	0.21	122
	F4	1.17	0.21	136
	F5	0.87	0.21	144
	F6	1.3	0.21	149
	F7	1.1	0.21	154
C	C1	1.79	0.2	80
	C2	1.62	0.2	102
	C3	1.37	0.2	106
	C4	1.17	0.2	129
	C5	0.87	0.2	144
	C6	1.3	0.2	186
D	D1	1.64	0.12	62
	D2	1.7	0.12	71
	D3	1.51	0.12	102
	D4	1.05	0.12	102
	D5	1.24	0.12	106
	D6	1.07	0.12	136
	D7	1.49	0.12	144
	D8	0.88	0.12	145
	D9	1.8	0.12	176
	D10	1.81	0.12	182
	D11	1.46	0.12	184
	D12	1.35	0.12	256
E	E1	1.76	0.05	47
	E2	1.68	0.05	80
	E3	1.65	0.05	81
	E4	1.28	0.05	92
	E5	1.51	0.05	102
	E6	1.45	0.05	102
	E7	1.2	0.05	106
	E8	1.07	0.05	106
	E9	0.97	0.05	124
	E10	1.35	0.05	124
	E11	1.56	0.05	129
	E12	1.39	0.05	143
	E13	1.14	0.05	171

Tabla A.2a Puntos de fisuración y nivel de carga Q en el SFOD1 de la viga I-1

Punto	X(m)	Y(m)	Q (kN)
E1	1.76	0.05	47
D1	1.64	0.12	62
D2	1.7	0.12	71
C1	1.79	0.2	80
E2	1.68	0.05	80
E3	1.65	0.05	81
F1	1.79	0.21	82
E4	1.28	0.05	92
C2	1.62	0.2	102
D3	1.51	0.12	102
D4	1.05	0.12	102
E5	1.51	0.05	102
E6	1.45	0.05	102
B1	1.82	0.28	103
F2	1.62	0.21	103
G1	1.83	0.29	105
C3	1.37	0.2	106
D5	1.24	0.12	106
E7	1.2	0.05	106
E8	1.07	0.05	106
B2	1.43	0.28	122
F3	1.37	0.21	122
G2	1.44	0.29	124
E9	0.97	0.05	124
E10	1.35	0.05	124
C4	1.17	0.2	129
E11	1.56	0.05	129
F4	1.17	0.21	136
D6	1.07	0.12	136

Tabla A.2b Puntos de fisuración y nivel de carga Q en el SFOD1 de la viga I-1

Punto	X(m)	Y(m)	Q (kN)
G3	1.67	0.29	137
E12	1.39	0.05	143
F5	0.87	0.21	144
C5	0.87	0.2	144
D7	1.49	0.12	144
B3	0.99	0.28	145
D8	0.88	0.12	145
B4	1.65	0.28	146
B5	1.24	0.28	147
G4	1.26	0.29	148
G5	1.01	0.29	148
F6	1.3	0.21	149
F7	1.1	0.21	154
B6	1.09	0.28	157
E13	1.14	0.05	171
A1	1.89	0.36	173
D9	1.8	0.12	176
D10	1.81	0.12	182
D11	1.46	0.12	184
C6	1.3	0.2	186
A2	1.195	0.36	200
A3	1.215	0.36	200
A4	1.28	0.36	216
A5	1.82	0.36	216
G6	1.15	0.29	216
B7	1.12	0.28	216
B8	0.9	0.28	236
D12	1.35	0.12	256

Tabla A.3 Puntos de fisuración y nivel de carga Q en las Secciones horizontales del SFOD de la viga I-2.

Sección	Punto	X(m)	Y(m)	Q (kN)
A	A1	1.88	0.38	121
	A2	2.46	0.38	163
	A3	1.85	0.38	197
	A4	2.27	0.38	206
	A5	2.15	0.38	231
B	B1	1.78	0.29	99
	B2	3.07	0.29	117
	B3	3.18	0.29	129
	B4	3.27	0.29	142
	B5	1.38	0.29	178
	B6	1.27	0.29	183
	B7	0.93	0.29	197
	B8	1.83	0.29	219
C	C1	2	0.21	88
	C2	1.76	0.21	93
	C3	1.7	0.21	95
	C4	1.62	0.21	104
	C5	1.5	0.21	120
	C6	1.39	0.21	125
	C7	1.22	0.21	142
	C8	1.07	0.21	154
	C9	1.93	0.21	163
	C10	0.76	0.21	178
	C11	0.71	0.21	197
	C12	0.93	0.21	205
D	D1	1.99	0.12	68
	D2	1.7	0.12	90
	D3	1.56	0.12	93
	D4	1.4	0.12	110
	D5	1.87	0.12	112
	D6	1.27	0.12	117
	D7	1.13	0.12	142
	D8	1.21	0.12	142
	D9	0.98	0.12	155
	D10	0.8	0.12	197
	D11	1.61	0.12	225

Tabla A.4 Puntos de fisuración y carga Q en las Secciones verticales del SFOD de la viga I.2

Sección	Punto	X(m)	Y(m)	Q (kN)
1	11	0.63	0.24	179
	12	0.63	0.25	197
	13	0.63	1.2	264
2	21	0.73	0.18	192
	22	0.73	0.22	197
	23	0.73	0.31	197
3	31	0.9	0.33	197
	32	0.9	0.23	197
	33	0.9	0.29	198
	34	0.9	0.25	199
	35	0.9	0.27	244
	36	0.9	0.18	262
4	41	1.06	0.21	154
	42	1.06	0.22	159
	43	1.06	0.18	178
	44	1.06	0.27	178
	45	1.06	0.3	197
	46	1.06	0.35	197
5	51	1.17	0.17	142
	52	1.17	0.25	177
6	61	1.35	0.2	120
	62	1.35	0.23	161
	63	1.35	0.27	177
	64	1.35	0.28	177
	65	1.35	0.32	244
7	71	1.51	0.24	117
	72	1.51	0.25	126
	73	1.51	0.23	137
	74	1.51	0.22	163
8	81	1.66	0.26	118
	82	1.66	0.21	129
	83	1.66	0.3	134
	84	1.66	0.35	134
	85	1.66	0.16	177
9	91	1.81	0.35	110
	92	1.82	0.34	115
	93	1.82	0.33	133
	94	1.82	0.28	244
	95	1.82	0.27	281

Tabla A.5a Puntos de fisuración y nivel de

carga Q en el SFOD de la viga I-2.

Punto	X(m)	Y(m)	Q (kN)
D1	1.99	0.12	68
C1	2.00	0.21	88
D2	1.7	0.12	90
C2	1.76	0.21	93
D3	1.56	0.12	93
C3	1.7	0.21	95
B1	1.78	0.29	99
C4	1.62	0.21	104
D4	1.4	0.12	110
91	1.81	0.35	110
D5	1.87	0.12	112
92	1.82	0.34	115
B2	3.07	0.29	117
D6	1.27	0.12	117
71	1.51	0.24	117
81	1.66	0.26	118
C5	1.5	0.21	120
61	1.35	0.2	120
A1	1.88	0.38	121
C6	1.39	0.21	125
72	1.51	0.25	126
B3	3.18	0.29	129
82	1.66	0.21	129
93	1.82	0.33	133
83	1.66	0.3	134
84	1.66	0.35	134
73	1.51	0.23	137
B4	3.27	0.29	142
C7	1.22	0.21	142
D7	1.13	0.12	142
D8	1.21	0.12	142
51	1.17	0.17	142
C8	1.07	0.21	154
41	1.06	0.21	154
D9	0.98	0.12	155
42	1.06	0.22	159
62	1.35	0.23	161
A2	2.46	0.38	163
C9	1.93	0.21	163
74	1.51	0.22	163

Tabla A.5b Puntos de fisuración y nivel de

carga Q en el SFOD de la viga I-2.

Punto	X(m)	Y(m)	Q (kN)
101	1.97	0.14	169
52	1.17	0.25	177
63	1.35	0.27	177
64	1.35	0.28	177
85	1.66	0.16	177
B5	1.38	0.29	178
C10	0.76	0.21	178
43	1.06	0.18	178
44	1.06	0.27	178
102	1.97	0.23	178
11	0.63	0.24	179
B6	1.27	0.29	183
21	0.73	0.18	192
103	1.97	0.2	193
A3	1.85	0.38	197
B7	0.93	0.29	197
C11	0.71	0.21	197
D10	0.8	0.12	197
12	0.63	0.25	197
22	0.73	0.22	197
23	0.73	0.31	197
31	0.90	0.33	197
32	0.90	0.23	197
45	1.06	0.3	197
46	1.06	0.35	197
104	1.97	0.19	197
33	0.90	0.29	198
34	0.90	0.25	199
105	1.97	0.24	201
C12	0.93	0.21	205
A4	2.27	0.38	206
B8	1.83	0.29	219
D11	1.61	0.12	225
A5	2.15	0.38	231
35	0.90	0.27	244
65	1.35	0.32	244
94	1.82	0.28	244
36	0.90	0.18	262

Tabla A.6 Puntos de fisuración y nivel de carga Q en las Secciones horizontales del SFOD de la viga I-3.

Sección	Punto	X (m)	Y (m)	Q (kN)
A	A1	1.40	0.38	257
B	B1	1.63	0.29	207
	B2	0.75	0.29	217
	B3	1.53	0.29	232
	B4	1.17	0.29	246
C	C1	1.57	0.21	171
	C2	1.44	0.21	204
	C3	1.2	0.21	223
	C4	1.41	0.21	224
	C5	1.06	0.21	226
	C6	1.22	0.21	231
D	D1	1.32	0.13	157
	D2	1.57	0.13	158
	D3	1.21	0.13	160
	D4	1.42	0.13	171
	D5	0.718	0.13	215
	D6	1.16	0.13	220
	D7	1.03	0.13	222
	D8	0.78	0.13	235
	D9	0.74	0.13	241
	D10	0.86	0.13	254

Tabla A.7 Puntos de fisuración y nivel de carga Q en las Secciones verticales del SFOD de la viga

I-3.

Sección	Punto	X (m)	Y (m)	Q (kN)
2	21	0.72	0.368	230
3	31	0.82	0.3	230
4	41	0.94	0.2	225
	42	0.94	0.17	237
	43	0.94	0.22	237
	44	0.94	0.29	237
	45	0.94	0.25	252
5	51	1.06	0.19	212
	52	1.06	0.33	213
	53	1.06	0.15	213
	54	1.06	0.14	220
	55	1.06	0.23	221
6	61	1.19	0.22	161
	62	1.19	0.2	193
	63	1.19	0.26	212
	64	1.19	0.19	214
	65	1.19	0.24	222
7	71	1.31	0.23	183
	72	1.31	0.19	183
	73	1.31	0.15	213
	74	1.31	0.34	214
	75	1.31	0.3	214
	76	1.31	0.21	215
8	81	1.45	0.24	167
	82	1.45	0.2	168
	83	1.45	0.3	241
	84	1.45	0.26	202
	85	1.45	0.28	212
	86	1.45	0.33	215
9	91	1.56	0.33	162
	92	1.56	0.2	163
	93	1.56	0.24	171
	94	1.56	0.28	176
	95	1.56	0.21	183
	96	1.56	0.18	183
	97	1.56	0.3	183
10	101	1.68	0.21	155
	102	1.68	0.3	161
	103	1.68	0.26	162
	104	1.68	0.18	165
	105	1.68	0.33	175
	106	1.68	0.25	180
	107	1.68	0.19	183

Tabla A.8a Puntos de fisuración y nivel de carga Q en el SFOD de la viga I-3.

Punto	X(m)	Y(m)	Q (kN)
101	1.68	0.21	155
D1	1.32	0.13	157
D2	1.57	0.13	158
D3	1.21	0.13	160
61	1.19	0.22	161
102	1.68	0.3	161
91	1.56	0.33	162
103	1.68	0.26	162
92	1.56	0.2	163
104	1.68	0.18	165
81	1.45	0.24	167
82	1.45	0.2	168
C1	1.57	0.21	171
D4	1.42	0.13	171
93	1.56	0.24	171
105	1.68	0.33	175
94	1.56	0.28	176
106	1.68	0.25	180
71	1.31	0.23	183
72	1.31	0.19	183
95	1.56	0.21	183
96	1.56	0.18	183
97	1.56	0.3	183
107	1.68	0.19	183
62	1.19	0.2	193
84	1.45	0.26	202
C2	1.44	0.21	204
B1	1.63	0.29	207
51	1.06	0.19	212
63	1.19	0.26	212
85	1.45	0.28	212
52	1.06	0.33	213

Tabla A.8b Puntos de fisuración y nivel de carga Q en el SFOD de la viga I-3.

Punto	X(m)	Y(m)	Q (kN)
53	1.06	0.15	213
73	1.31	0.15	213
64	1.19	0.19	214
74	1.31	0.34	214
75	1.31	0.3	214
D5	0.718	0.13	215
76	1.31	0.21	215
86	1.45	0.33	215
B2	0.75	0.29	217
D6	1.16	0.13	220
54	1.06	0.14	220
55	1.06	0.23	221
D7	1.03	0.13	222
65	1.19	0.24	222
C3	1.2	0.21	223
C4	1.41	0.21	224
41	0.94	0.2	225
C5	1.06	0.21	226
21	0.72	0.368	230
31	0.82	0.3	230
C6	1.22	0.21	231
B3	1.53	0.29	232
D8	0.78	0.13	235
42	0.94	0.17	237
43	0.94	0.22	237
44	0.94	0.29	237
D9	0.74	0.13	241
83	1.45	0.3	241
B4	1.17	0.29	246
45	0.94	0.25	252
D10	0.86	0.13	254
A1	1.4	0.38	257

Tabla A.9 Deformaciones máximas en los puntos de fisuración en la viga I-1 del SFOD1

Carga (kN)	60	62	71	80	94	102	106	122	148	187	192	199	209	216	224	262
Punto fisuración	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με
A3												115	24	306	156	117
A2												122	204	272	123	60
A4														131	168	344
A5														139	136	182
G1							233	4199	680	2838	2407	2495	2298	2583	2233	2807
G3									3326	4552	2021	6941	4579	3605	10188	6367
G2									688	716	723	686	679	5790	621	411
G4									384	2668	6547	6323	10046	6428	1316	6789
G6														2782	2898	4499
G5									191	2964	3846	1933	3819	1980	9486	904
B1						122	1137	1821	1869	2295	3087	1786	4372	2335	2349	2968
B4									199	5089	3087	4689	1144	4437	4913	5771
B2								171	1304	1874	1714	9004	3916	1894	1900	3514
B5									311	5008	1752	489	2793	3970	4226	2021
B7														2938	3036	2567
B6										4490			6512	2771	499	601
B3									606		270	13053		738	737	4314
B8																5043
F1					171	3927	2079	410	1399	1895	5695	5760	369	2050	3196	783
F2						83			1438	7707	5546	3075	1704	6050	7223	3007
F3										4102	951	959	671	0	3849	389
F6											1411		67	193	348	794
F4									2553	2771	2900	6523	3748	4550	7069	2030
C1				130		1052	247	2973	202	1630	6468	414	226	1964	5281	1650
C2						605	244	373	8641	139	8551	4633	7840	4445	583	5785
C3							196	118	4723	4696	1756	2304	42	2536	1893	351
C4									2714	4796	167	4304	1785	218	3523	1235
C5									2211	7535	3016	496	5134	5969	1637	4679
D9											299	341	346	0	1609	6653
D1	128	128														
D2			129		465	101	3603	2925	656	5909	367	668	1090	1694	1797	529
D3					114	1019	6578	6563	756	1469	4515	6518	5864	1923	4437	6908
D7											3521	6518	5908	363	318	8121
D5							4124	1371	3519	5859	703	586	3780	2886	1048	5145
D6											2603	1732	417	7158	1016	4071
D4						163	199	158	8090	8634	3118	6436	2432	7657	933	4383
D8											203	177	57	226	55	286
D11														547	2936	13744

Tabla A.10 Deformaciones máximas en los puntos de fisuración en la viga I-2 del SFOD en dirección horizontal

Carga (kN)	67	76	88	95	100	115	123	142	203	213	224	260
Punto fisuración	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με
A1							288	3045	6485	5917	14771	12182
A2									481	9030	5830	18077
A4									358	358	487	1483
A5												1483
A3									660	4149	3635	8689
B8												63
B1					577	1730	2861	7626	15538	7086	3231	12724
B2							1289	4735	735	3775	3059	842
B3								5511	3476	6196	796	12724
B4									1832	1576	5082	4410
B5									3147	3384	5082	7632
B6									2380	1196	13649	8324
B7									4573	14198	9399	4372
B9												460
B10												3055
B11												343
C1		153	106	7167	7815	5081	2936	5697	5612	3470	2245	7105
C9									3983	7506	1286	3576
C2			113	198	7178	907	73	1392	1268	11408	4642	2897
C3				198	412	300	936	4682	1268	11408	7451	2897
C4							1959	12620	5069	7506	7519	3237
C5							936	1732	6427	22843	10327	9752
C6									1676	3874	5807	3576
C7									725	7641	10670	3848
C8									2762	2932	6697	3848
C10									3576	2663	2382	8667
C11									9345	6026	6218	5952
C12										8089		3848
D1	190	2165	1809	11237	8261	3835	7860	693	9200	12622	3172	14723
D5							6624	686	485	8394	14485	1472
D2			221	2390	1916	2763	9992	15335	9362	3843	3534	4246
D3				11359	1187	11263	1876	1660	5779	11752	3353	10115
D4						236	6875	2011	9688	10622	10141	13482
D6							1675	3902	8141	2811	276	8894
D8									11562	5016	7788	13664
D7									3580	1761	12675	10775
D9									14249	6575	6430	7576
D10									6267	6424	4982	6668
D11												12300

Tabla A.11 Deformaciones máximas en los puntos de fisuración en la viga I-2 del SFOD en dirección vertical

Carga (kN)	115	123	142	203	213	224	260
Punto fisuración	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με
12				13355	14175	5611	3791
11				3057	3121	3227	1675
13							6492
21				394	1584	17638	21334
22				16071	1256	3950	13413
23							8778
35				125	750	2325	13821
32				248	210	294	5508
34				994	576	1114	2333
33				11301	3620		10438
31				7450	60	9669	1957
36					259	255	8599
43				5210	319	2603	12588
41				3705	22417	2784	3753
42				6861	4871	3538	7601
44				248	319	291	17737
45				220	319	291	4945
46				5712	5530	6187	9661
52				2161	11161	2965	12966
51				16817	2545	3114	5635
62				8144	4989	5292	6663
61		184	869	2644	3728	8295	17345
63				175	218	383	145
64				10550	1048	2185	4977
74				7649	3190	3688	12211
73				11035	2504	20146	4865
71		1327	2232	5716	8681	16966	2332
72				19188	7308	7990	15631
84				2863	1049	1497	4832
83				329	283	263	1251
81		263	3592	6107	12278	3091	6593
82				183	174	200	17008
85				1769	8231	5138	3060
86							3347
91	266	2138	14231	5356	1695	2845	14114
92							6856
93							5469
94							1229
95							3920
101				194	235	279	1383
102				297	7105	4103	2957
103				1694	2988	7790	11016
104							2188
105							9466

Tabla A.12 Deformaciones máximas en los puntos de fisuración en la viga I-3 del SFOD en dirección horizontal

Carga (kN)	158	163	169	171	203	207	222	224	232	245	258
Punto fisuración	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με
A1											4295
B3									66	4943	6524
B1						4086	7002	11540	6962	378	7286
B2									10588	4211	
B4										1325	3524
C2					1736	2698	12929	4316	12458	7761	7250
C1			-8	144	4454	3522	3886	17292	811	9254	4871
C4								6383	12953	6612	12800
C3								3167	8753	182	
C5								3856	16441	16947	6457
C6									8753	756	467
D1	409	935	140	-7	8819	11316	208	355	5096	8126	8467
D2		2512	488	4354	2440	2711	9991	6467	2530	1484	13701
D3				3758	39	2334	643	523	620	629	336
D4		120	45	1531	3463	10760	9498	5346	9357	3969	4075
D6							14337	467	4664	17344	3981
D7							4124	411	3398	11417	897
D8										342	2206
D10											2486

Tabla A.13 Deformaciones máximas en los puntos de fisuración en la viga I-3 del SFOD en dirección vertical

Carga (kN)	158	163	169	171	203	207	222	224	232	245	258
Punto fisuración	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με	OBRmáx με
31									581	530	542
42										2907	429
41							1189	14614	4645	529	429
43											6957
51							400	6063	10704	227	446
52							477	1516	15811	318	502
53							6256	989	9610	14455	5432
55							615	547	241	227	408
61		244	255	9744	312	320	5048	709	618	1600	4886
62					332	320	680	656	617	1600	688
63							3163	556	596	1512	565
64							437	418	528	4152	2786
65							605	5207	1840	10312	521
71					295	307	16524	3495	3597	403	382
72					400	384	15792	568	452	1163	5490
73							290	358	576	340	382
74							290	2274	3476	3474	3379
75							512	526	600	514	572
76							7462	442	504	561	509
81			264	253	402	379	687	560	534	6022	15547
83					13718	358	401	560	619	656	3216
84					170	253	16787	12080	1088	11799	6163
82		226	226	226	1418	2726	7154	3280	5392	5373	3669
85							6967	520	491	7146	7613
86							11434	760	11102	8610	12192
87							7146	1680	6457		
91		3436	3436	232	343	3872	5324	3998	31848	2803	3420
92		18844	18844	246	362	17940	12113	8882	2463	8829	4415
93				312	1398	1982	8797	3113	2275	5624	4372
94					642	250	824	636	684	10494	12304
95					316		8679	543	965	1752	11622
96					298	355	389	415	497	479	679
97					1212	302	12113	686	7890	1009	15092
104			259	64	308	133	552	9870	425	3487	2125
101		258	272	839	11191	1920	650	3380	8088	19018	10503
103		205	203	206	6226	6160	5607	511	2223	4559	11226
102		256	220	218	363	6053	1485	576	3256	17552	37917
105					2870	293	552	609	2819	928	735
106							5166	2500	5393	6510	12361

Tabla A.7 Puntos de fisuración y nivel de carga Q en las Secciones C y D del SFOD de la viga

I-3 en flexión.

Sección	PUNTO	X (m)	Y(m)	Q (kN)
C	C1	4.73	0	47
	C2	4.93	0	51
	C3	5.15	0	57
	C4	4.18	0	59
	C5	3.48	0	59
	C6	3.78	0	63
	C7	5.47	0	67
	C8	5.13	0	67
	C9	4.34	0	67
	C10	4.8	0	69
	C11	4.62	0	71
	C12	4.98	0	73
	C13	4.9	0	73
	C14	3.88	0	73
	C15	3.58	0	75
	C37	4.08	0	100
D	D1	4.1	0	21
	D2	4.65	0	45
	D3	4.16	0	47
	D4	4.46	0	51
	D5	5.06	0	55
	D6	5.34	0	57
	D7	5.25	0	67
	D8	5.24	0	69
	D9	4.24	0	75
	D10	4.25	0	75
	D11	5.44	0	75
	D12	3.32	0	77
	D13	4	0	77
	D14	4.17	0	77
	D15	5.45	0	77
	D16	5	0	81
	D17	2.91	0	83
	D18	4.42	0	83
	D19	4.79	0	83
	D20	3.9	0	87
	D21	5.05	0	87
	D22	5.2	0	89
	D23	3.59	0	91
	D24	4.26	0	91
	D25	4.84	0	91
	D62	3.77	0	109